

第一章 习题与思考题

◇ 习题 1-1 欲使二极管具有良好的单向导电性，管子的正向电阻和反向电阻分别为大一些好，还是小一些好？

解：

二极管的正向电阻愈小愈好，反向电阻愈大愈好。理想二极管的正向电阻等于零，反向电阻等于无穷大。

本题的意图是掌握二极管的单向导电性。

◇ 习题 1-2 假设一个二极管在 50°C 时的反向电流为 $10\mu\text{A}$ ，试问它在 20°C 和 80°C 时的反向电流大约分别为多大？已知温度每升高 10°C ，反向电流大致增加一倍。

解：

在 20°C 时反向电流约为 $2^{-3} \times 10\mu\text{A} = 1.25\mu\text{A}$

在 80°C 时反向电流约为 $2^3 \times 10\mu\text{A} = 80\mu\text{A}$

本题的意图是通过估算，理解二极管的反向电流将随温度的升高而急剧增大。

◇ 习题 1-3 某二极管的伏安特性如图 P1-3(a)所示：

① 如在二极管两端通过 $1\text{k}\Omega$ 的电阻加上 1.5V 的电压，见图 P1-3(b)，此时二极管的电流 I 和电压 U 各为多少？

② 如将图 P1-3(b)中的 1.5V 电压改为 3V ，则二极管的电流和电压各为多少？

提示：可用图解法。

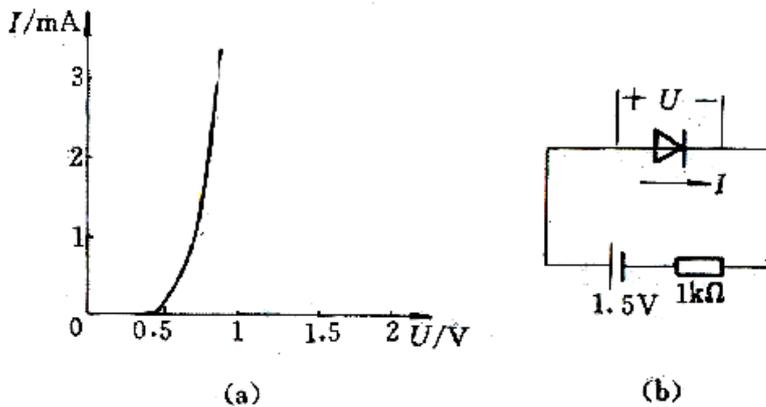


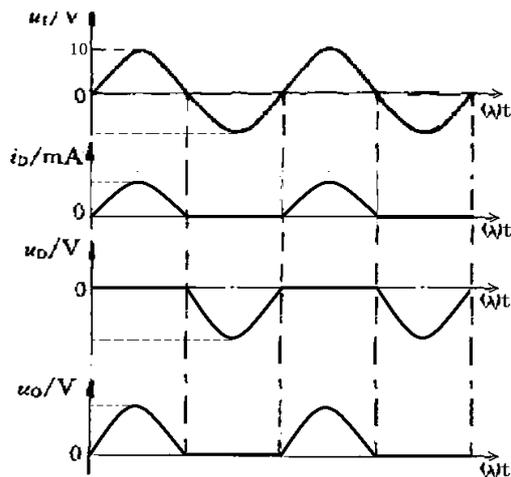
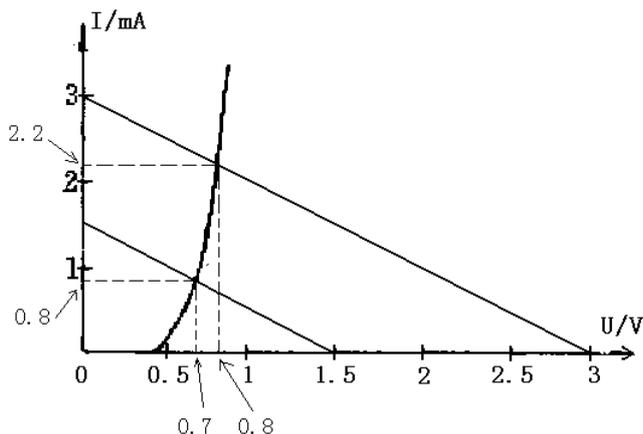
图 P1-3

解：

① 电源电压为 1.5V 时， $I=0.8\text{mA}$ ， $U=0.7\text{V}$ ；

② 电源电压为 2.2V 时， $I=2.2\text{mA}$ ， $U=0.8\text{V}$ 。

图解结果见下图：



习题1-4的波形图

经过观察可进一步得出结论：当二极管工作在正向特性区时，如电源电压增大，二极管的电流随之增大，但管子两端的电压变化不大。

本题的主要意图是加深对二极管伏安特性的理解，并练习用图解法估算二极管的电流和电压。

◇ 题 1-4 已知在图 P1-4 中， $u_1=10\sin \omega t(\text{V})$ ， $R_L=1\text{k}\Omega$ ，试对应地画出二极管的电流 i_D 、电压 u_0 的波形，并在波形图上标出幅值，设二极管的正向压降和反向电流可以忽略。

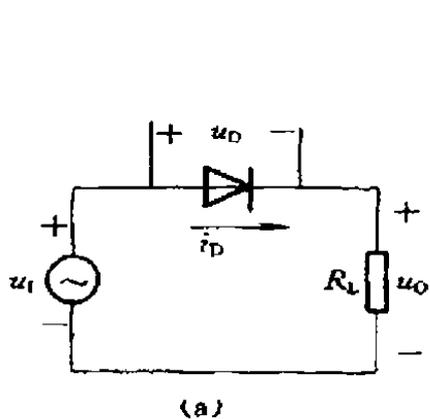
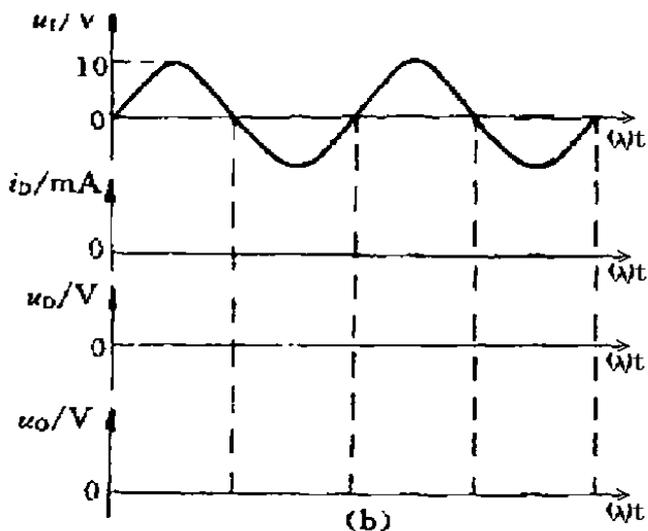


图 P1-4



解：

波形见图。

本题的意图是通过画波形图，理解二极管的单向导电性。

◇ 习题 1-5 欲使稳压管具有良好稳压特性，它的工作电流 I_Z 、动态内阻 r_z 以及温度系数 a_U 等各项参数，大一些好还是小一些好？

解：

动态内阻 r_z 愈小，则当稳压管的电流变化时稳压管的电压变化量愈小，即稳压性能愈好。

一般来说，对同一个稳压管而言，工作电流 I_Z 愈大，则其动态内阻 r_z 愈小，稳压性能也愈好。但应注意不要超过其额定功耗，以免损坏稳压管。

温度系数 a_U 的绝对值愈小，表示当温度变化时，稳压管的电压变化的百分比愈小，则稳压性能

愈好。

本题的意图是掌握稳压管的主要参数对稳压性能的影响。

◇ 习题 1-6 某稳压管在温度为 20°C ，工作电流为 5mA 时，稳定电压 $U_Z=10\text{V}$ ，已知其动态内阻 $r_Z=8\Omega$ ，电压的温度系数 $\alpha_U=0.009\%/^{\circ}\text{C}$ ，试问：

- ① 温度不变，工作电流改为 20mA 时， U_Z 约等于多少？
- ② 当工作电流仍为 5mA ，但温度上升至 50°C 时， U_Z 约等于多少？

解：

$$\textcircled{1} \quad \Delta U_Z = \Delta I_Z r_Z = (20 - 5) \times 10^{-3} \text{A} \times 8\Omega = 0.12\text{V}, \quad \text{则}$$

$$U_Z(10 + 0.12)\text{V} = 10.12\text{V}$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta U_Z / U_Z = \Delta T \alpha_U = (50 - 20)^{\circ}\text{C} \times 0.009\%/^{\circ}\text{C} = 2.7\%, \quad \text{则}$$

$$U_Z = 10\text{V} \times (1 + 2.7\%) = 10.27\text{V}$$

◇ 习题 1-7 在图 P1-7 中，已知电源电压 $V=10\text{V}$ ， $R=200\Omega$ ， $R_L=1\text{k}\Omega$ ，稳压管的 $U_Z=6\text{V}$ ，试求：

- ① 稳压管中的电流 I_Z 为多少？
- ② 当电源电压 V 升高到 12V ， I_Z 将变为多少？
- ③ 当 V 仍为 10V ，但 R_L 改为 $2\text{k}\Omega$ 时， I_Z 将变为多少？

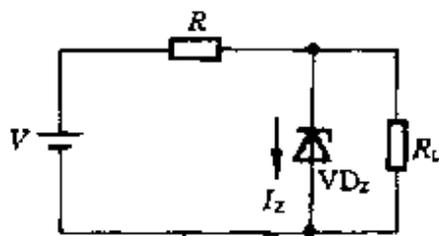


图 P1-7

解：

$$\textcircled{1} \quad I_Z = \frac{U - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \frac{10\text{V} - 6\text{V}}{200\Omega} - \frac{6\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 20\text{mA} - 6\text{mA} = 14\text{mA}$$

$$\textcircled{2} \quad I_Z = \frac{U - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \frac{12\text{V} - 6\text{V}}{200\Omega} - \frac{6\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 30\text{mA} - 6\text{mA} = 24\text{mA}$$

$$\textcircled{3} \quad I_Z = \frac{U - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \frac{10\text{V} - 6\text{V}}{200\Omega} - \frac{6\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 20\text{mA} - 3\text{mA} = 17\text{mA}$$

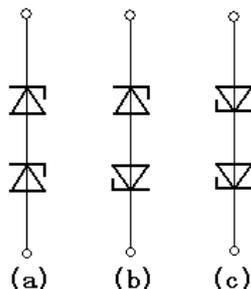
本题的意图是说明当外加电压或负载电流变化时，通过调节稳压管的电流可保持稳压管两端电压基本不变。

◇ 习题 1-8 设有两个相同型号的稳压管，稳压值均为 6V ，当工作在正向时管压降均为 0.7V ，如果将它们用不同的方法串联后接入电路，可能得到几种不同的稳压值？试画出各种不同的串联方法。

解：

如图所示，可有 3 种不同的串联方法。

- 稳压值分别为：
- (a) 12V
 - (b) 6.7V
 - (c) 1.4V



本题的意图是了解两个同型号的稳压管可采用不同的串联方法以得到不同的稳压值。

◇ 习题 1-9 一个三极管的输出特性曲线见图 P1-9:

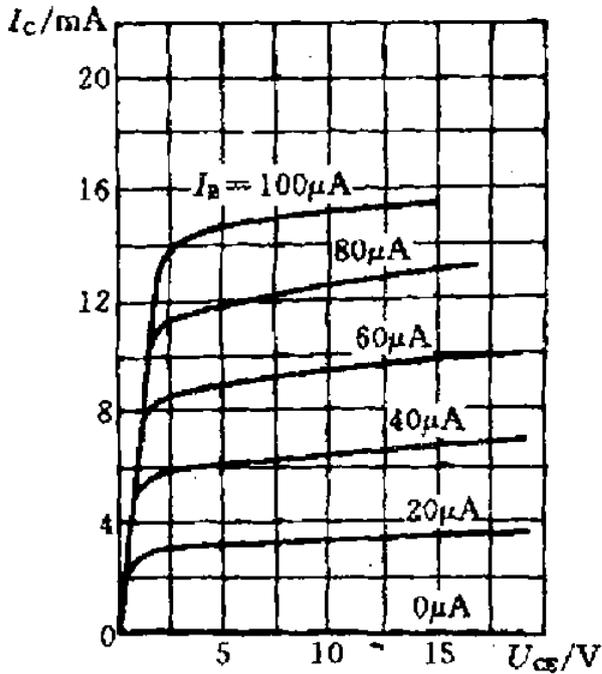


图 P1-9

① 试在图上求出 $U_{CE}=5V$, $I_C=6mA$ 处的电流放大系数 $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 β 和 α ，并时行比较。

② 设三极管的极限参数为 $I_{CM}=20mA$, $U_{(BR)CEO}=15V$, $P_{CM}=100mW$ ，试在图 P1-9 的特性曲线上画出三极管的安全工作区。

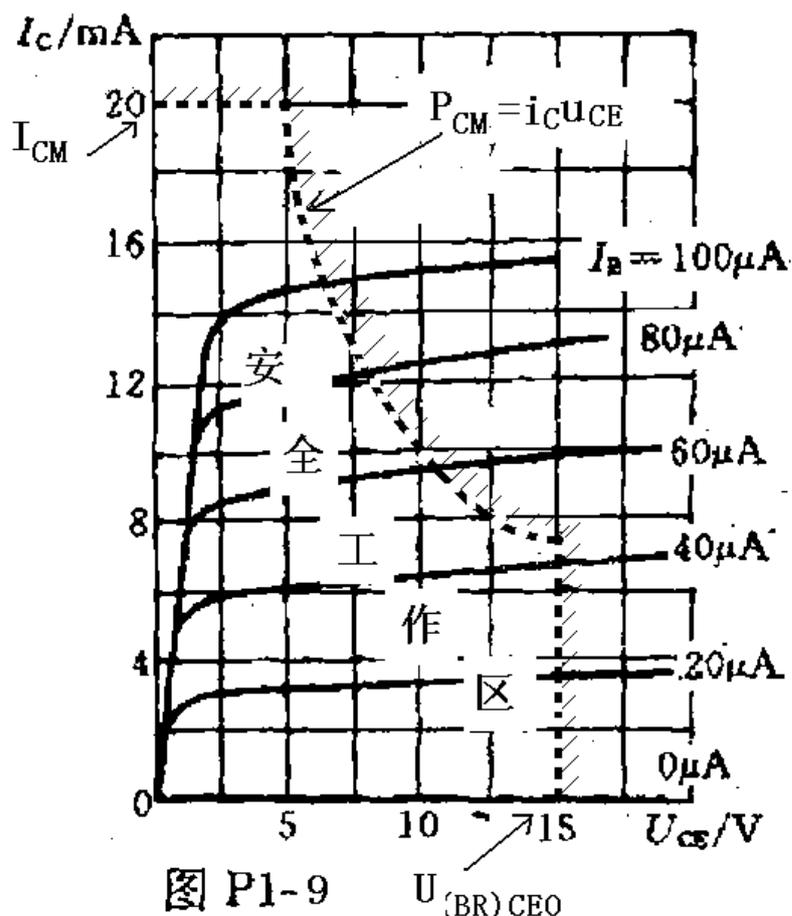
解:

$$\textcircled{1} \quad \bar{\beta} \approx \frac{i_C}{i_B} = \frac{6}{0.04} = 150, \quad \bar{\alpha} \approx \frac{i_C}{i_E} = \frac{6}{6.04} \approx 0.993$$

$$\beta \approx \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{9-3.2}{0.06-0.02} = 145, \quad \alpha \approx \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{9-3.2}{9.06-3.22} \approx 0.993$$

② 三极管的安全工作区如下图所示。

本题的意图是训练在三极管的输出特性曲线上用作图的方法求上述 4 个电流放大系数，理解直流电流放大系数与对应的交流电流放大系数的定义不同，但数值接近。同时，训练在输出特性曲线上画出三极管的安全工作区。



◇ 习题 1-10 有两个三极管, 已知第一个管子的 $\bar{\beta}_1 = 99$, 则 $\bar{\alpha}_1 = ?$ 当该管的 $I_{B1} = 10 \mu A$ 时, 其 I_{C1} 和 I_{E1} 各等于多少? 已知第二个管子的 $\bar{\alpha}_2 = 0.95$, 则其 $\bar{\beta}_2 = ?$ 若该管的 $I_{E2} = 1mA$, 则 I_{C2} 和 I_{B2} 各等于多少?

解:

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{\bar{\beta}_1}{1 + \bar{\beta}_1} = \frac{99}{1 + 99} = 0.99$$

$$\textcircled{1} \quad I_{C1} \approx \bar{\beta}_1 I_{B1} = 99 \times 10 \mu A = 990 \mu A$$

$$I_{E1} \approx (1 + \bar{\beta}_1) I_{B1} = (1 + 99) \times 10 \mu A = 1000 \mu A$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{\bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{0.95}{1 - 0.95} = 19$$

$$\textcircled{2} \quad I_{C2} \approx \frac{\bar{\beta}_2}{1 + \bar{\beta}_2} I_{E2} = \frac{19}{1 + 19} \times 1mA = 0.95mA$$

$$I_{B2} \approx \frac{1}{1 + \bar{\beta}_2} I_{E2} = \frac{1}{1 + 19} \times 1mA = 0.05mA = 50 \mu A$$

本题的主要意图是掌握 $\bar{\beta}$ 与 $\bar{\alpha}$ 的含义及二者之间的关系。

◇ 习题 1-11 设某三极管在 20°C 时的反向饱和电流 $I_{CBO} = 1\mu\text{A}$, $\beta = 30$; 试估算该管在 50°C 时的 I_{CBO} 和穿透电流 I_{CEO} 大致等于多少。已知每当温度升高 10°C 时, I_{CBO} 大约增加一倍, 而每当温度升高 1°C 时, β 大约增大 1% 。

解:

$$20^{\circ}\text{C} \text{ 时, } I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} = (1 + 30) \times 1\mu\text{A} = 31\mu\text{A};$$

$$I_{CBO} \approx 8\mu\text{A},$$

$$50^{\circ}\text{C} \text{ 时, } \beta \approx 30 + 30 \times 30\% = 39$$

$$I_{CEO} \approx (1 + \beta)I_{CBO} = (1 + 39) \times 8\mu\text{A} = 320\mu\text{A}$$

本题的意图是理解当温度升高时三极管的 I_{CBO} 将急剧增大, β 也将增大, 因而 I_{CEO} 将更为急剧增大。

◇ 习题 1-12 一个实际的 PNP 型锗三极管的输入、输出特性曲线图 P1-12(a)和(b)所示。

① 查看该三极管的穿透电流 I_{CEO} 约为多大, 输入特性的死区电压约为多大。

② 为了使 PNP 型三极管工作在放大区, 其 u_{BE} 和 u_{CE} 的值分别应该大于零还是小于零? 并与 NPN 型三极管作比较。

解:

① 由图可见, 该 PNP 三极管的约为 0.4mA , 死区电压约为 -0.2V 。

② 无论 NPN 或 PNP 三极管, 工作在放大区的外部直流偏置条件均为发射结正向偏置, 集电结反向偏置。而对 PNP 三极管来说, 应为 $u_{BE} < 0$, $u_{BC} > 0$ 。

本题的意图是了解 PNP 三极管的特性曲线, 以及 PNP 三极管工作在放大区的条件。

◇ 习题 1-13 测得某电路中几个三极管的各极电位如图 P1-13 所示, 试判断各三极管分别工作在截止区, 放大区还是饱和区?

解:

(a) 在图(a)中, $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $U_{BC} = -4.3\text{V}$, 即发射结正偏, 集电结反偏, 故三极管工作在放大区。

(b) 在图(b)中, $U_{BE} = -10\text{V}$, $U_{BC} = -10\text{V}$, 即发射结、集电结均反偏, 故三极管工作在截止区。

(c) 在图(c)中, $U_{BE} = 0.7\text{V}$, $U_{BC} = -5.3\text{V}$, 即发射结正偏, 集电结反偏, 故三极管工作在放大区。

(d) 在图(d)中, $U_{BE} = 0.75\text{V}$, $U_{BC} = 0.45\text{V}$, 即发射结、集电结均正偏, 故三极管工作在饱和区。

(e) 在图(e)中, $U_{BE} = 0.3\text{V}$, $U_{BC} = 5.3\text{V}$, 即发射结、集电结均反偏, 故三极管工作在截止区。

(f) 在图(f)中, $U_{BE} = -0.3\text{V}$, $U_{BC} = 0$, 即 $U_{CE} = U_{BE}$, 发射结正偏, 集电结电压为 0, 故三极管工作在临界饱和状态。

(g) 在图(g)中, $U_{BE} = -0.3\text{V}$, $U_{BC} = 8.7\text{V}$, 即发射结正偏, 集电结反偏, 故三极管工作在放大区。

(h) 在图(h)中, $U_{BE} = -0.3\text{V}$, $U_{BC} = 3.7\text{V}$, 即发射结正偏, 集电结反偏, 故三极管工作在放大区。

本题的意图是训练根据各极电位判断三极管工作在什么区, 深入理解三极管截止区、放大区和饱和区的特点。

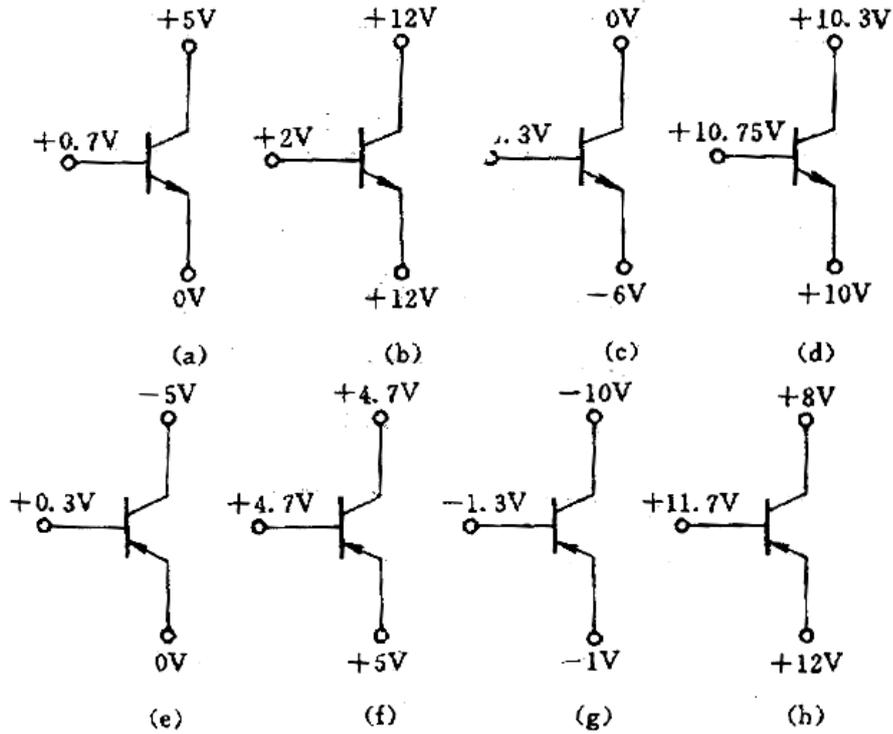


图 P1-13

◇ 习题 1-14 已知图 P1-14(a)~(f)中各三极管的 β 均为 50, $U_{BE} \approx 0.7V$, 试分别估算各电路中三极管的 I_C 和 U_{CE} , 判断它们各自工作在哪个区(截止区、放大区或饱和区), 并将各管子的工作点分别画在图 P1-14 (g) 的输出特性曲线上。

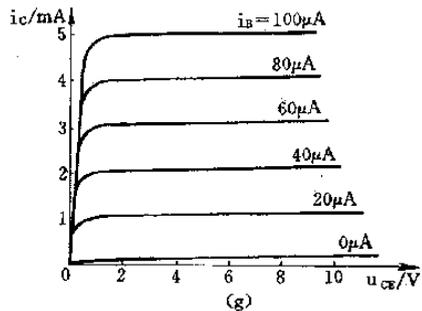
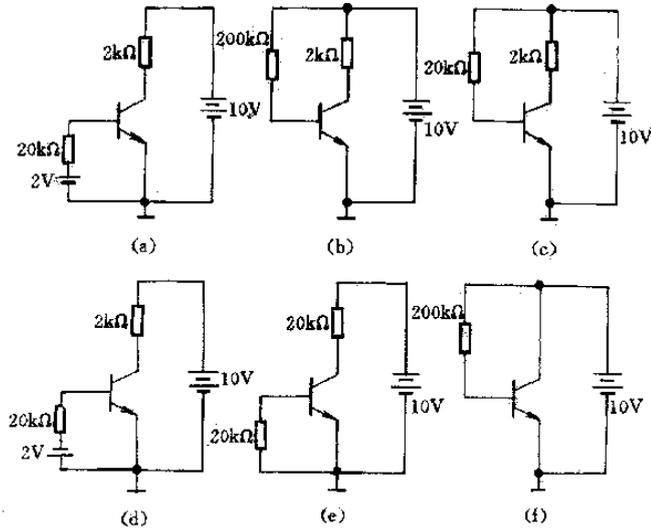


图 P1-14

解:

$$i_B \approx \frac{2V - 0.7V}{20k\Omega} = \frac{1.3V}{20000\Omega} = 0.065mA$$

$$(a) i_C \approx \beta i_B = 50 \times 0.065mA = 3.25mA$$

$$u_{CE} = 10 - 2k\Omega \times 3.25mA = 3.5V$$

三极管工作在放大区，见下图中的 A 点。

$$i_B \approx \frac{10V - 0.7V}{200k\Omega} = \frac{9.3V}{200000\Omega} = 0.0465mA$$

$$(b) i_C \approx \beta i_B = 50 \times 0.0465mA = 2.325mA$$

$$u_{CE} = 10 - 2k\Omega \times 2.325mA = 5.35V$$

三极管工作在放大区，见下图中的 B 点。

$$i_B \approx \frac{10V - 0.7V}{20k\Omega} = \frac{9.3V}{20000\Omega} = 0.465mA$$

$$(c) i_C \approx \beta i_B = 50 \times 0.465mA = 23.25mA$$

$$u_{CE} = 10 - 2k\Omega \times 23.25mA = -36.5V$$

以上计算出的 i_C 和 u_{CE} 的值是荒谬的，实质上此时三极管已工作在饱和区，故应为

$$i_B \approx \frac{10V - 0.7V}{20k\Omega} = \frac{9.3V}{20000\Omega} = 0.465mA$$

$$i_C \approx 10V / 2k\Omega = 5mA$$

$$u_{CE} = U_{CES} \approx 0.3V$$

见下图中 C 点。

$$(d) u_{BE} = -2V, \quad i_B \approx 0, \quad i_C \approx 0, \quad u_{CE} = V_{CC} = 10V$$

三极管工作在截止区，见下图中 D 点。

$$(e) u_{BE} = 0V, \quad i_B = 0, \quad i_C \approx 0, \quad u_{CE} = V_{CC} = 10V$$

三极管工作在截止区，见下图中 E 点，E 点和 D 点基本重合。

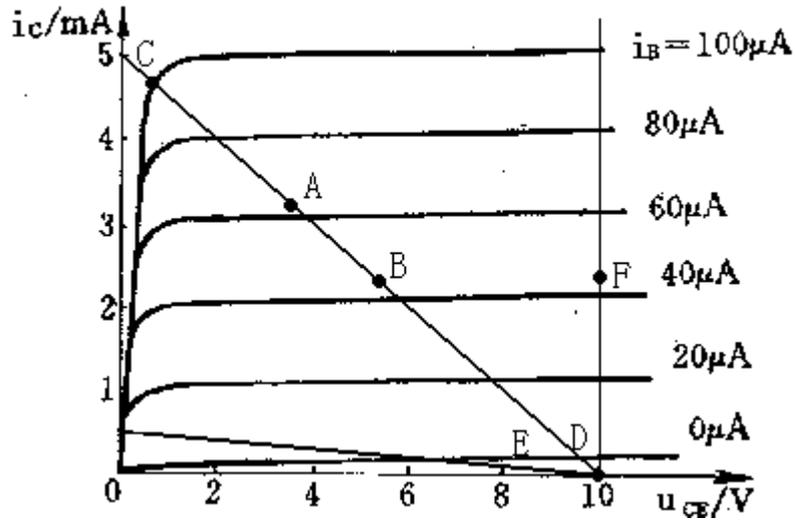
$$i_B \approx \frac{10V - 0.7V}{200k\Omega} = \frac{9.3V}{200000\Omega} = 0.0465mA$$

$$(f) i_C \approx \beta i_B = 50 \times 0.0465mA = 2.325mA$$

$$u_{CE} = V_{CC} = 10V$$

三极管工作在放大区，见下图中的 F 点。

本题的意图是根据电路参数判断三极管工作在什么区，并在输出特性曲线上画出工作点的位置，以便形象地建立工作点地概念。



◇ 习题 1-15 分别测得两个放大电路中三极管的各极电位如图 P1-15(a)和 (b)所示, 试识别它们的管脚, 分别标上 e、b、c, 并判断这两个三极管是 NPN 型, 还是 PNP 型, 硅管还是锗管。

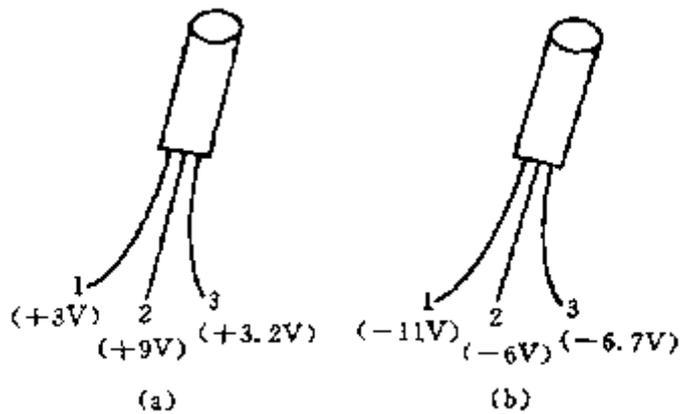


图 P1-15

解:

- (a) 1—发射极 e, 3—基极 b, 2—集电极 c, NPN 型锗管;
- (b) 2—发射极 e, 3—基极 b, 1—集电极 c, PNP 型硅管。

本题的意图是训练根据放大电路中的三极管的各极电位识别引脚, 并判断三极管的类型。

注意: 本题的前提是两个三极管均工作在放大区。

习题 1-16 已知一个 N 沟道增强型 MOS 场效应的漏极特性曲线如图 P1-16 所示，试作出 $U_{DS}=15V$ 时的转移特性曲线，并由特性曲线求出该场效应管的开启电压 $U_{GS(th)}$ 和 I_{D0} 值，以及当 $U_{DS}=15V$ ， $U_{GS}=4V$ 时的跨导 g_m 。

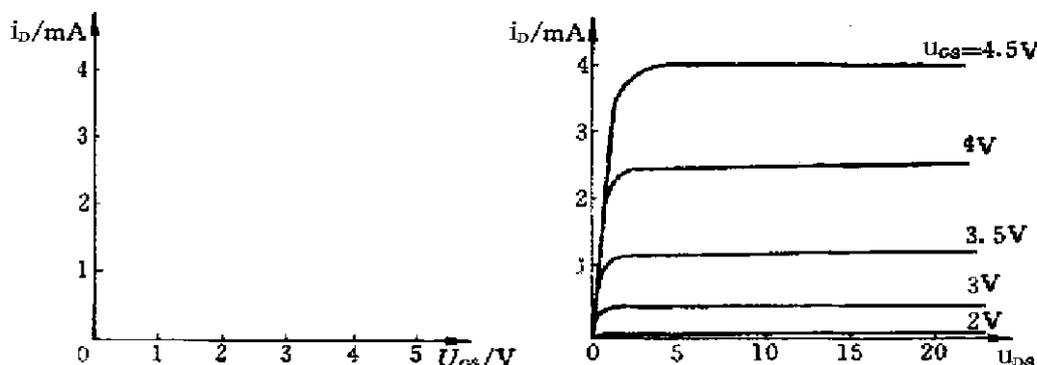
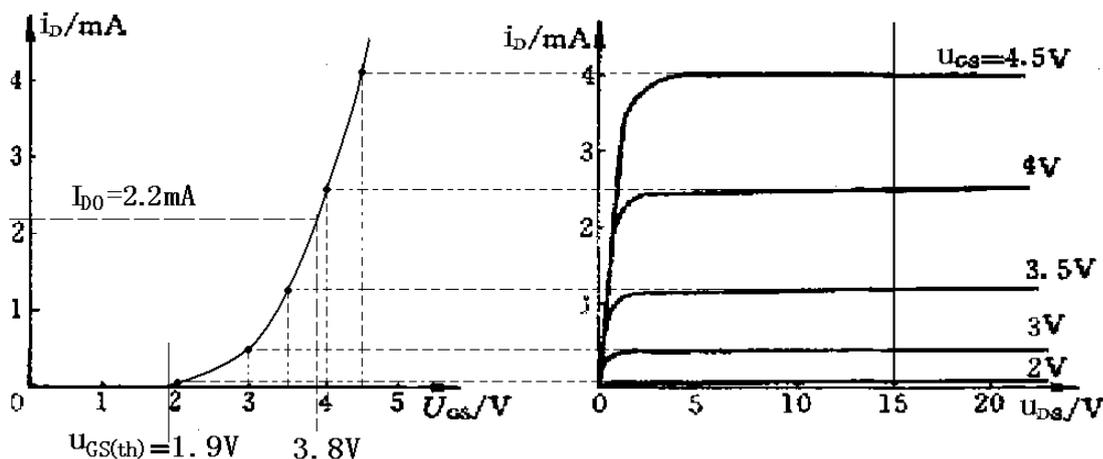


图 P1-16

解：

作图过程如下图所示。



由图可得 $U_{GS(th)} \approx 1.9V$ ， $I_{D0} = 2.2mA$

$$g_m \approx \frac{\Delta i_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{4 - 1.2}{4.5 - 3.5} mS = 2.8 mS$$

本题的意图是加强对场效应管的输出特性曲线和转移特性曲线的理解，并训练在场效应管的输出特性曲线上用作图法画转移特性，并求 $U_{GS(th)}$ 、 I_{D0} 和 g_m 的值。

◇ **习题 1-17** 试根据图 P1-17 所示的转移特性曲线，分别判断各相应的场效应管的类型(结型或绝缘栅型，P 型沟道或 N 型沟道，增强型或耗尽型)。如为耗尽型，在特性上标注出其夹断电压 $U_{GS(off)}$ 和饱和漏极电流 I_{DSS} ；如为增强型，标出其开启电压 $U_{GS(th)}$ 。

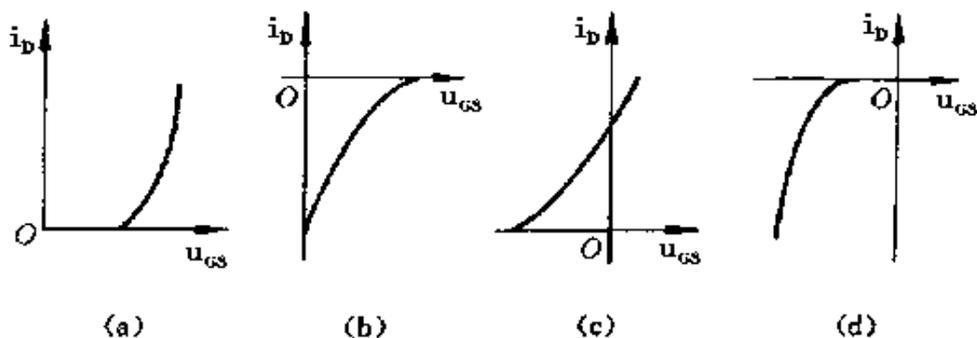
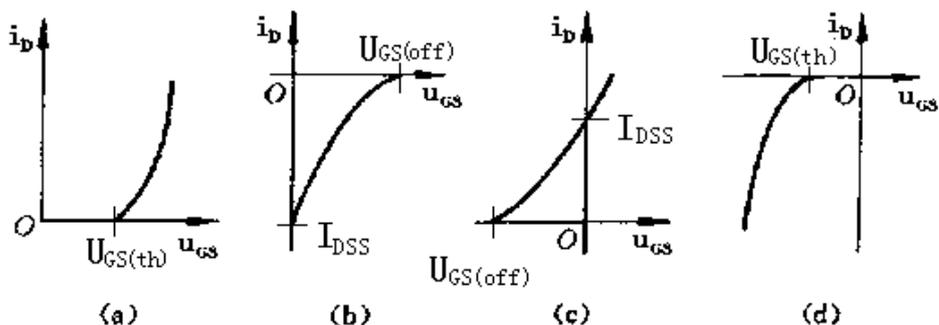


图 P1-17

解:

- (a) N 沟道增强型绝缘栅场效应管。
- (b) P 沟道耗尽型结型场效应管。
- (c) N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管。
- (d) P 沟道增强型绝缘栅场效应管。

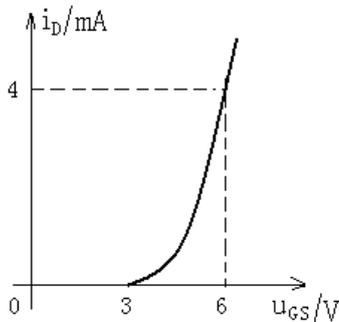


本题的意图是根据转移特性识别场效应管的类型，并从转移特性上指认 I_{DSS} 和 $U_{GS(th)}$ 或 $U_{GS(off)}$ 。

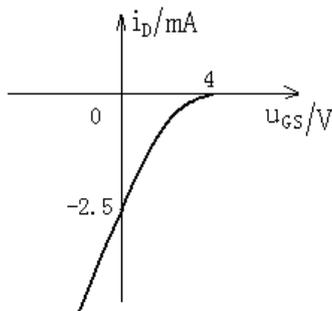
◇ 习题 1-18 已知一个 N 沟道增强型 MOS 场效应管的开启电压 $U_{GS(th)} = +3V$, $I_{D0} = 4mA$, 请示意画出其转移特性曲线。

◇ 习题 1-19 已知一个 P 沟道耗尽型 MOS 场效应管的饱和漏极电流 $I_{DSS} = -2.5mA$, 夹断电压 $U_{GS(off)} = 4V$, 请示意画出其转移特性曲线。

解:



习题1-18

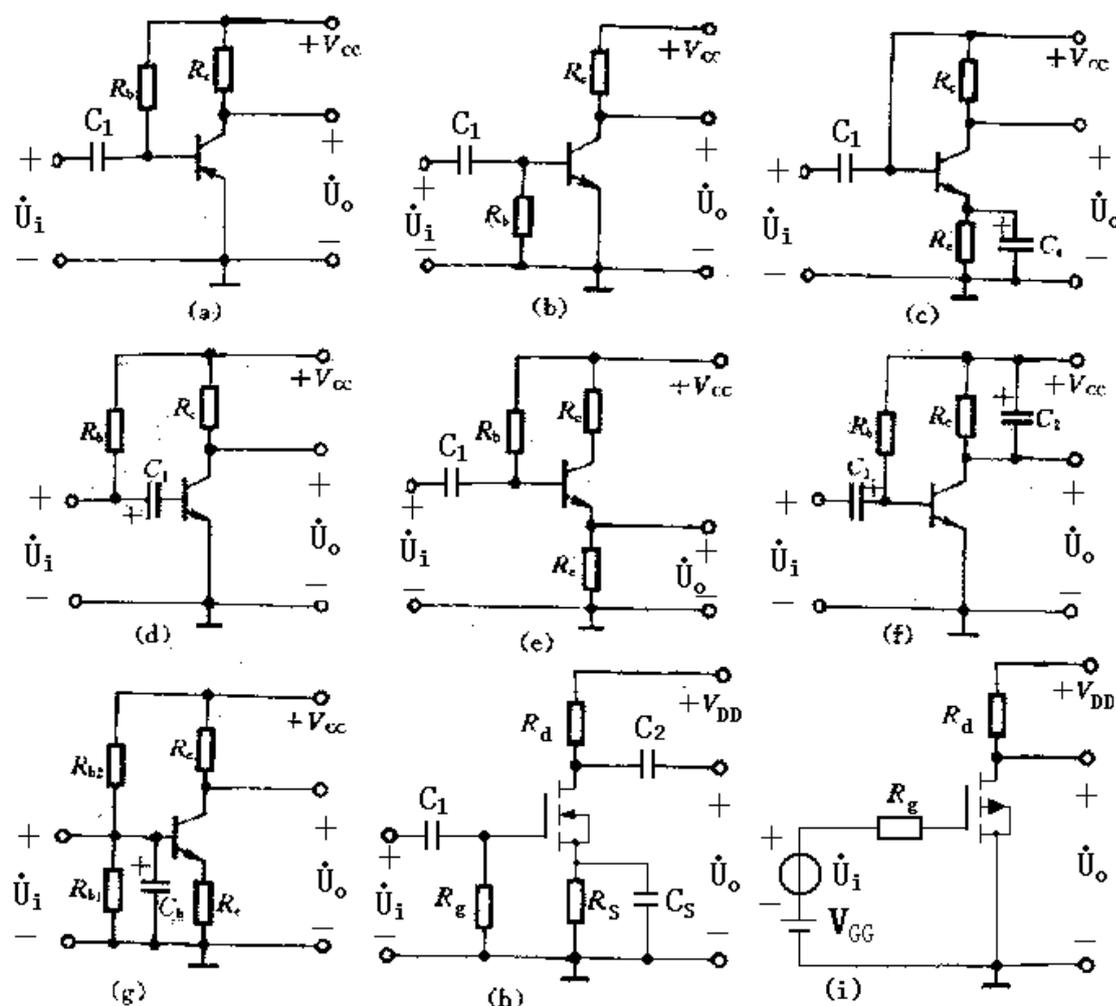


习题1-19

此二题的意图是根据给定的 $U_{GS(th)}$ 和 I_{D0} 或 $U_{GS(off)}$ 和 I_{DSS} , 示意画出场效应管的转移特性。第二章

习题与思考题

◆ 题 2-1 试判断图 P2-1 中各放大电路有无放大作用，简单说明理由。



图P2-1

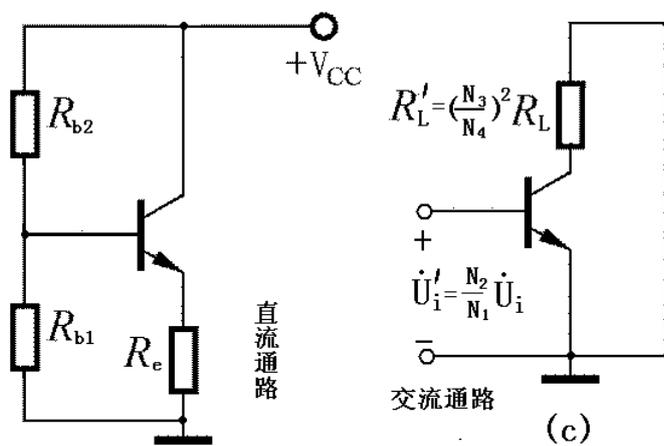
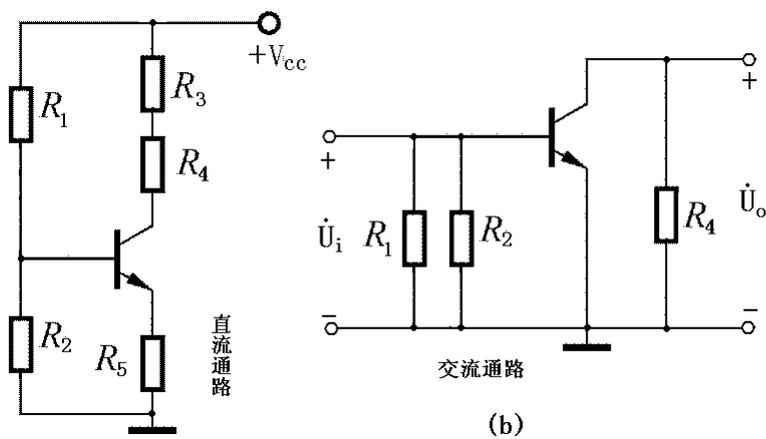
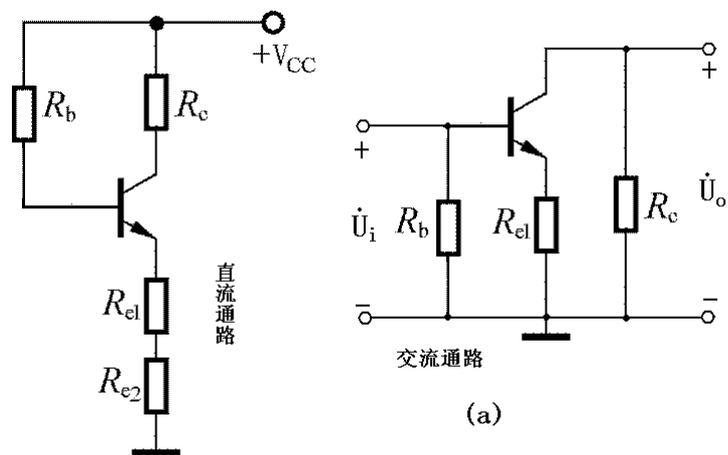
解:

- (a) 无放大作用，不符合“发射结正偏，集电结反偏”的外部直流偏置要求；
- (b) 不能正常放大，三极管发射结没有偏置（正偏）；
- (c) 无放大作用，三极管集电结没有偏置（反偏）；
- (d) 无放大作用，三极管发射结没有偏置（正偏）；
- (e) 有放大作用（电压放大倍数小于 1）；
- (f) 无放大作用，电容 C_2 使输出端对地交流短路，输出交流电压信号为 0；
- (g) 无放大作用，电容 C_b 使三极管基极对地交流短路，输入交流信号无法加至三极管基极；
- (h) 不能正常放大，场效应管栅源之间无直流偏置；
- (i) 无放大作用， V_{GG} 的极性使场效应管不能形成导电沟道。

本题的意图是掌握放大电路的组成原则和放大原理。

◆ 题 2-2 试画出 P2-2 中各电路的直流通路和交流通路。设电路中的电容均足够大，变压器为理想变压器。

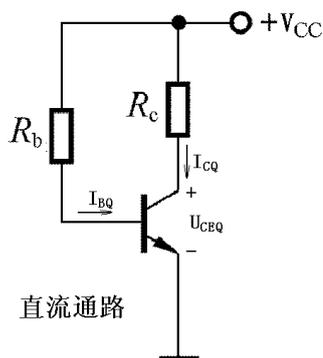
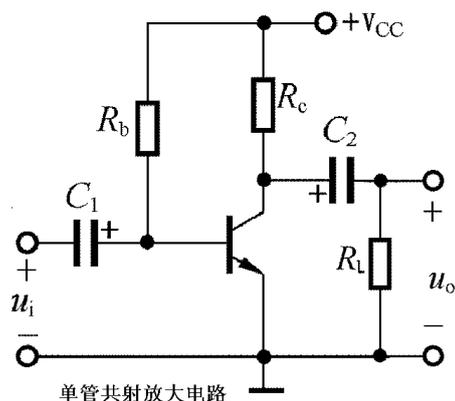
解：



本题的意图是掌握直流通路和交流通路的概念，练习画出各种电路的直流通路和交流通路。

◆ **题 2-3** 在 NPN 三极管组成的单管共射放大电路中，假设电路其他参数不变，分别改变以下某一项参数时，试定性说明放大电路的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 将增大、减小还是不变。① 增大 R_b ；② 增大 V_{CC} ；③ 增大 β 。

解：



$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

① $R_b \uparrow \Rightarrow I_{BQ} \downarrow \Rightarrow I_{CQ} \downarrow \Rightarrow U_{CEQ} \downarrow$

② $V_{CC} \uparrow \Rightarrow I_{BQ} \uparrow \Rightarrow I_{CQ} \uparrow \Rightarrow U_{CEQ} (= V_{CC} \uparrow - R_c I_{CQ} \uparrow)$ 不定

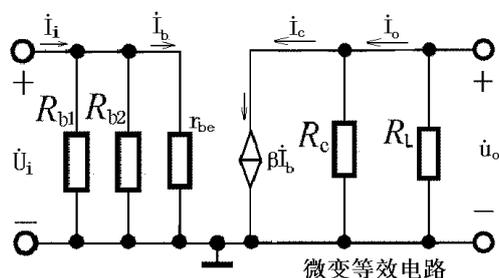
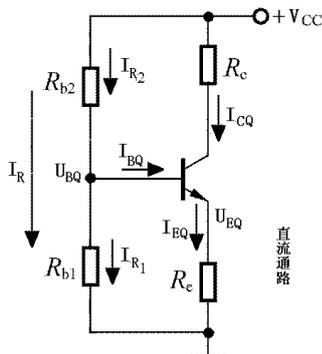
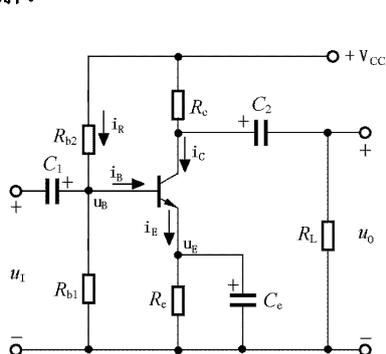
③ $\beta \uparrow \Rightarrow \begin{cases} I_{BQ} \text{ 基本不变} \\ I_{CQ} \uparrow \Rightarrow V_{CEQ} \downarrow \end{cases}$

本题的意图是理解单管共射放大电路中各种参数变化时对 Q 点的影响。

◆ **题 2-4** 在图 2.5.2 所示 NPN 三极管组成的分压式工作点稳定电路中，假设电路其他参数不变，分别改变以下某一项参数时，试定性说明放大电路的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 、 r_{be} 和 $|\dot{A}_u|$ 将增大、减小还是不变。

① 增大 R_{b1} ；② 增大 R_{b2} ；③ 增大 R_e ；④ 增大 β 。

解：



$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \quad I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_e \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_e)$$

$$I_{BQ} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta} \quad r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}} \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

$$\textcircled{1} \quad R_{b1} \uparrow \Rightarrow U_{BQ} \uparrow \Rightarrow U_{EQ} \uparrow \Rightarrow I_{CQ} \approx I_{EQ} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} I_{BQ} \uparrow \\ U_{CEQ} \downarrow \\ r_{be} \downarrow \Rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow \end{cases}$$

$$\textcircled{2} \quad R_{b2} \uparrow \Rightarrow U_{BQ} \downarrow \Rightarrow U_{EQ} \downarrow \Rightarrow I_{CQ} \approx I_{EQ} \downarrow \Rightarrow \begin{cases} I_{BQ} \downarrow \\ U_{CEQ} \uparrow \\ r_{be} \uparrow \Rightarrow |\dot{A}_u| \downarrow \end{cases}$$

$$\textcircled{3} \quad R_e \uparrow \Rightarrow I_{CQ} \approx I_{EQ} \downarrow \Rightarrow \begin{cases} I_{BQ} \downarrow \\ U_{CEQ} \uparrow \\ r_{be} \uparrow \Rightarrow |\dot{A}_u| \downarrow \end{cases}$$

$$\textcircled{4} \quad \left. \begin{array}{l} I_{CQ} \approx I_{EQ} \text{ 基本不变} \\ \beta \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} I_{BQ} \downarrow \\ U_{CEQ} \text{ 基本不变} \\ r_{be} \uparrow \Rightarrow |\dot{A}_u| \text{ 基本不变或略增大} \end{cases}$$

本题的意图是理解分压式稳定 Q 放大电路中各种参数变化时对 Q 点和电压放大倍数的影响。

◆ 题 2-5 设图 P2-5 中的三极管 $\beta = 100, U_{BEQ} = 0.6V, V_{CC} = 12V, R_C = 3k\Omega, R_b = 120k\Omega$ 。求静态工作点处的 I_{BQ}, I_{CQ} 和 U_{CEQ} 值。

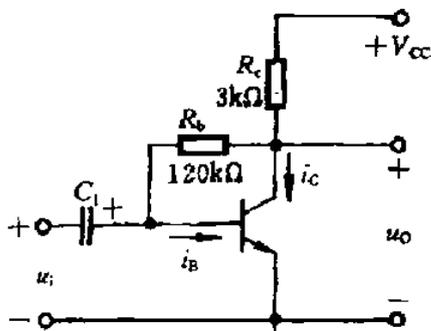
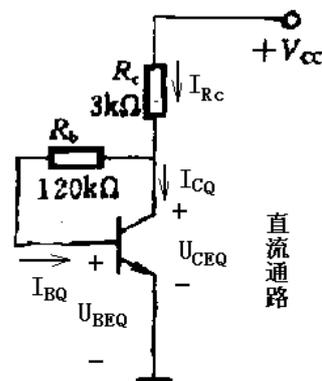


图 P2-5



解:

$$I_{R_c} R_c + I_{BQ} R_b + U_{BEQ} = V_{CC}$$

$$(I_{CQ} + I_{BQ}) R_c + I_{BQ} R_b + U_{BEQ} = V_{CC}$$

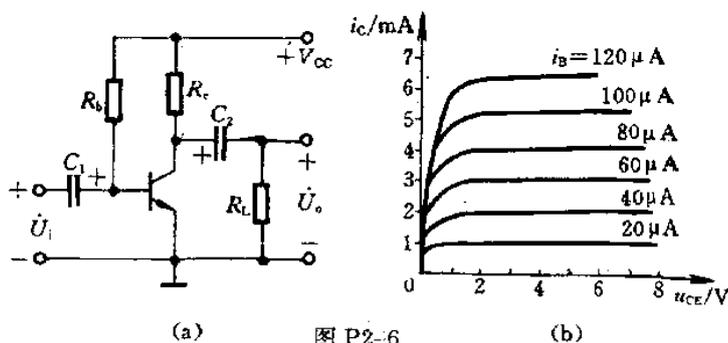
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_c} = \frac{12 - 0.6}{120 + (1 + 100) \times 3} \approx 0.027 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 100 \times 0.027 \text{ mA} = 2.7 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{R_c} R_c = 12 - (2.7 + 0.027) \times 3 \approx 3.82 \text{ V}$$

本题的意图是学习运用静态分析的基本方法求解一个简单的但课堂上并未讲过的放大电路的静态工作点。

◆ 题 2-6 已知图 P2-2(a)中: $R_b=510\text{k}\Omega$, $R_c=10\text{k}\Omega$, $R_L=1.5\text{k}\Omega$, $V_{CC}=10\text{V}$ 。三极管的输出特性如图(b)所示。① 试用图解法求出电路的静态工作点, 并分析这个工作点选得是否合适; ② 在 V_{CC} 和三极管不变的情况下, 为了把三极管的静态集电极电压 U_{CEQ} 提高到 5V 左右, 可以改变哪些参数? 如何改法? ③ 在 V_{CC} 和三极管不变的情况下, 为了使 $I_{CQ}=2\text{mA}$, $U_{CEQ}=2\text{V}$, 应改变哪些参数? 改成什么数值?



解:

① 先由估算法算出 I_{BQ}

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{10 - 0.7}{510} \text{ mA} \approx 0.02 \text{ mA} = 20 \mu\text{A}$$

然后, 由式 $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c = 10 - 10i_C$, 在输出特性曲线上画出直流负载线, 其与横、纵两个坐标轴的交点分别为 $(10\text{V}, 0)$ 和 $(0, 1\text{mA})$, 直流负载线与 $i_B=20\mu\text{A}$ 的一条输出特性曲线的交点 Q_1 即为静态工作点。

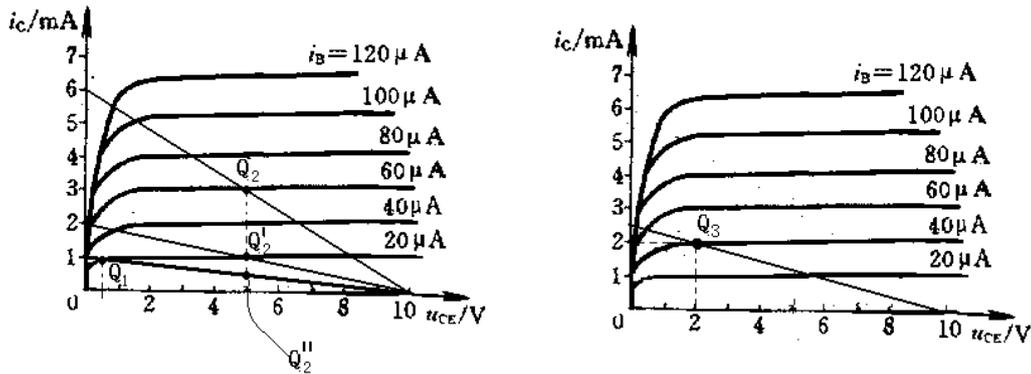
由 Q_1 可得, $U_{CEQ} \approx 0.5\text{V}$, $I_{CQ}=0.95\text{mA}$ 。可见, Q_1 点靠近饱和区, 位置不太合适, 容易产生饱和和失真。

② 在 V_{CC} 和三极管不变的情况下, 为了把三极管的静态集电极电压 U_{CEQ} 提高到 5V 左右, 可以改变的参数只有 R_b 和 (或) R_c , 有以下几种方法: 1) 同时减小 R_b 和 R_c , 如图中 Q_2 点; 2) R_b 不变, 减小 R_c , 如图中 Q'_2 点; 3) R_c 不变, 增大 R_b , 如图中 Q''_2 点; 4) 同时增大 R_b 和 R_c , 静态工作点在图中 Q''_2 点以下。

③ 在 V_{CC} 和三极管不变的情况下, 为了使 $I_{CQ}=2\text{mA}$, $U_{CEQ}=2\text{V}$, 可以改变的参数只有 R_b 和 (或) R_c 。将 $i_c=I_{CQ}=2\text{mA}$, $u_{CE}=U_{CEQ}=2\text{V}$ 的一点与横坐标轴上 $u_{CE}=10\text{V}$ 的一点相连即可得到此时的直流负载线, 此时集电极电阻为 $R_c = \frac{V_{CC} - U_{CEQ}}{I_{CQ}} = \frac{10 - 2}{2} \text{k}\Omega = 4\text{k}\Omega$, 由图可见, Q_3 点处 $I_{BQ}=40\mu\text{A}$, 则

$$R_b = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{I_{BQ}} = \frac{10 - 0.7}{0.04} \text{k}\Omega \approx 250\text{k}\Omega, \text{ 因此, 需要减小 } R_b \text{ 和 } R_c \text{ 为: } R_c=4\text{k}\Omega, R_b=250\text{k}\Omega。$$

Ω。



本题的意图是训练用图解法求 Q 点, 并分析电路参数对 Q 点的影响。

◆ 题 2-7 放大电路如图 P2-7(a) 所示。试按照给定参数, 在图 P2-7(b) 中:

- ① 画出直流负载线;
- ② 定出 Q 点(设 $U_{BEQ}=0.7\text{V}$);
- ③ 画出交流负载线。

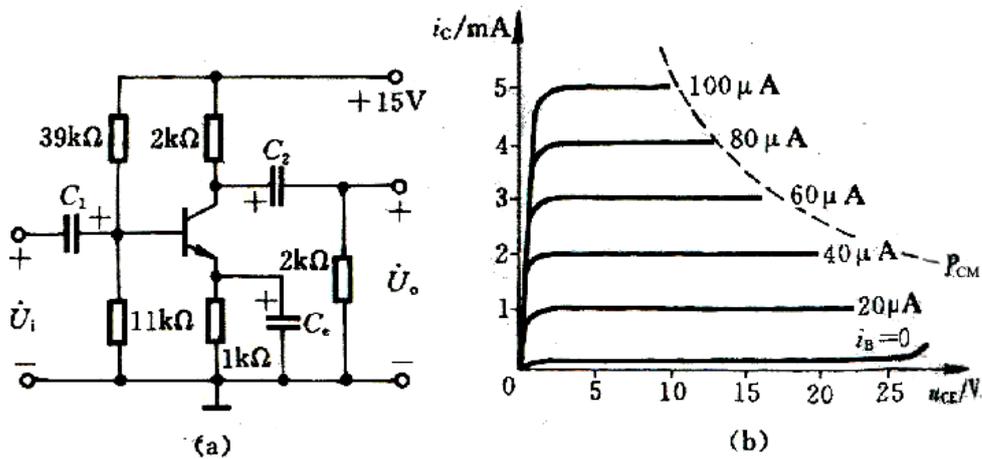


图 P2-7

解:

① 直流负载线方程为 $u_{CE} = V_{CC} - i_c R_c - i_E R_e \approx V_{CC} - i_c (R_c + R_e) = 15 - 3i_c$, 据此, 过横、纵两个坐标轴上两点 (15, 0) 和 (0, 5) 作一条直线, 即为直流负载线。

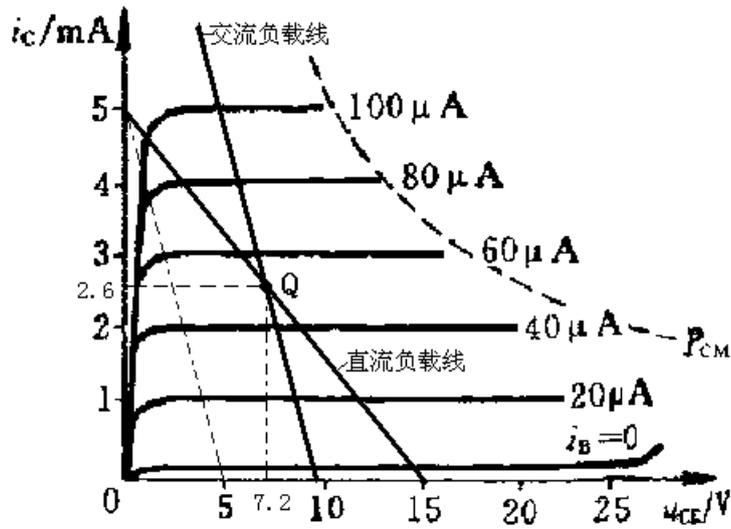
② 由给定电路的直流通路可得:

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} = \frac{11}{11 + 39} \times 15 = 3.3V,$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} = \frac{3.3 - 0.7}{1} = 2.6mA$$

则 $i_c = I_{CQ} = 2.6mA$ 的一条水平直线与直流负载线的交点即为 Q，由图可知， $U_{CEQ} = 7.2V$ 。

③ $R'_L = R_c // R_L = 1k\Omega$ ，交流负载线过 Q 点且斜率为 $-1/R'_L = -1$ ，如图所示。



本题的意图是训练用图解法进行静态和动态分析。

◆ 题 2-8 在图 P2-7(a) 电路中，如输出电压波形为 ，试问：

- ① 电路产生截止失真还是饱和失真？
- ② 应如何调整电路参数以消除失真？

解：① 电路产生饱和失真；

- ② 应降低 Q 点，为此可增大 R_{b2} 或减小 R_{b1} 。

本题的意图是用图解法分析波形失真。

◆ 题 2-9 试作出图 P2-9 中所示放大电路的负载线。已知： $R_b = 560k\Omega$ ， $R_c = 5.1k\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ ， $R_L = 1M\Omega$ ，两个直流电源均为 12V，三极管的输出特性曲线如图 P2-6(b) 所示。

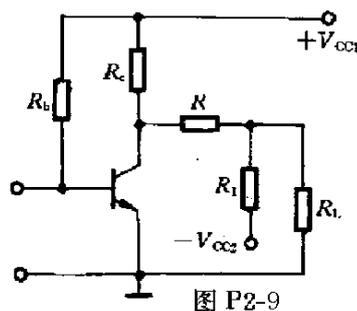
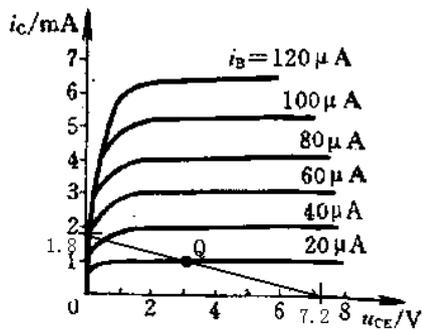
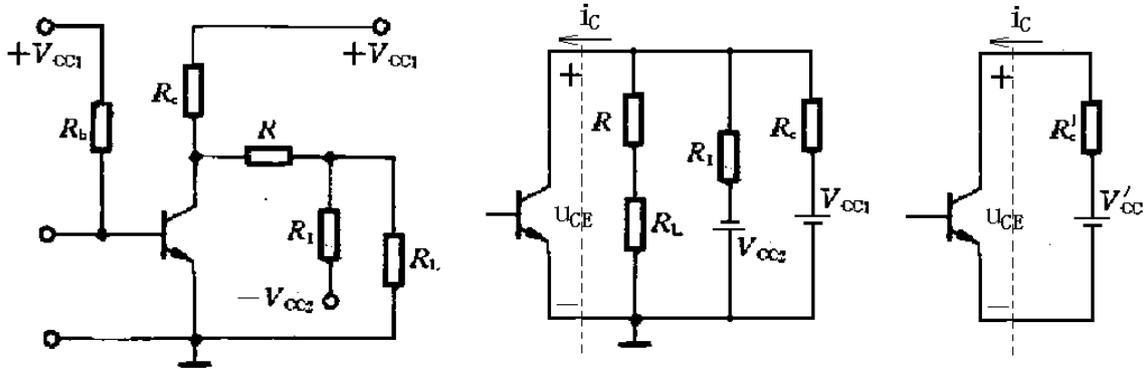


图 P2-9

解：

直流通路中三极管的输出回路的戴维南等效电路如图所示，其中 $V'_{CC} \approx 7.2V$, $R'_C \approx 4k\Omega$ ，则直流负载线方程为 $u_{CE} = 7.2 - 4i_C$ ，分别过输出特性曲线坐标系的横、纵两轴上的点 (7.2, 0) 和 (0, 1.8) 作一条直线，即得直流负载线。

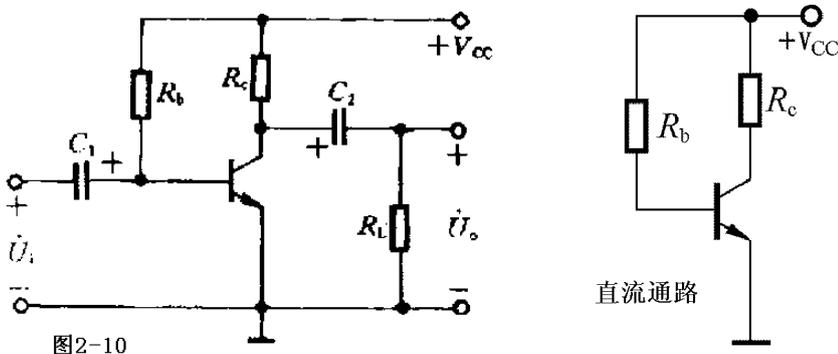


可估算出 $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{10 - 0.7}{560} mA \approx 0.02 mA = 20 \mu A$ ，则可得静态工作点 Q 如图所示。

本题的意图是学习运用图解的方法画出集电极回路含有多个电源的放大电路的负载线。

◆ 题 2-10 设图 P2-10 电路中三极管的 $\beta = 60$, $V_{CC} = 6V$, $R_c = 5k\Omega$, $R_b = 530k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$ ，试：

- ① 估算静态工作点；
- ② 求 r_{be} 值；
- ③ 求出电压放大倍数 A_u ，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



解：

- ① 1) 直流通路

2) 估算 Q

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b} = \frac{6 - 0.7}{530} \text{mA} = 0.01 \text{mA} = 10 \mu\text{A}$$

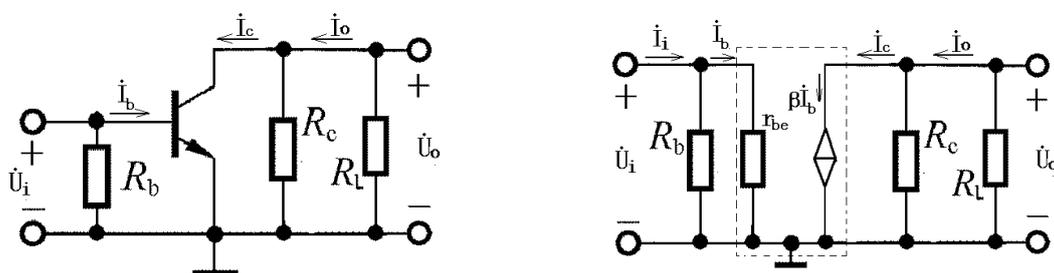
$$I_{EQ} \approx I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \approx \beta I_{BQ} = 60 \times 10 \mu\text{A} = 600 \mu\text{A} = 0.6 \text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (6 - 0.6 \times 5) \text{V} = 3 \text{V}$$

$$\textcircled{2} \quad r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} \approx [300 + (1 + 60) \frac{26(\text{mV})}{0.6}] \Omega = 2943 \Omega \approx 2.9 \Omega$$

③ 1) 交流通路

2) 微变等效电路



3) 电压放大倍数

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$\text{其中 } R'_L = R_C // R_L$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -60 \times \frac{5 // 5}{2.9} \approx -51.7$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (R_b // r_{be}) \quad R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be} = \frac{R_b r_{be}}{R_b + r_{be}} = \frac{530 \times 2.9}{530 + 2.9} \text{k}\Omega \approx 2.88 \text{k}\Omega$$

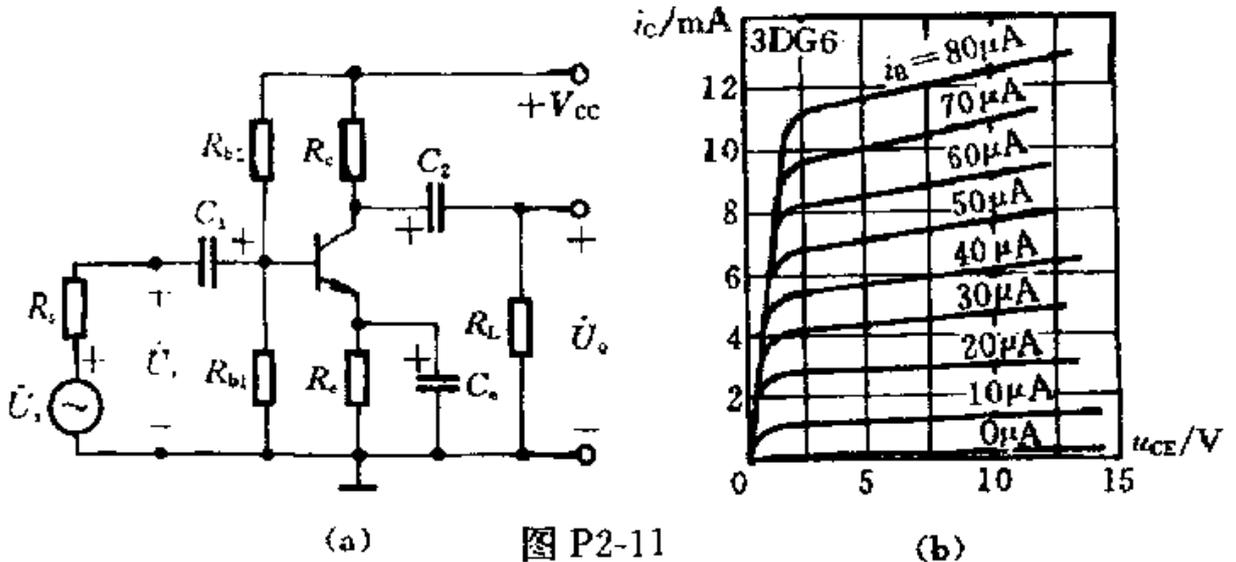
4) 输入电阻

5) 输出电阻

$$R_o = R_C = 5 \text{k}\Omega$$

本题的意图是训练估算最基本的单管共射放大电路的 Q 点，并用微变等效电路法分析其动态。

◆ 题 2-11 利用微变等效电路法, 计算图 P2-11(a) 电路的电压放大倍数、输入电阻及输出电阻。已知: $R_{b1}=2.5k\Omega$, $R_{b2}=10k\Omega$, $R_c=2k\Omega$, $R_e=750\Omega$, $R_L=1.5k\Omega$, $R_S=0$, $V_{CC}=15V$, 三极管的输出特性曲线如图(b)所示。



解:

1) 估算 Q 点

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} = \left(\frac{2.5}{2.5 + 10} \times 15 \right) V = 3V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \approx \frac{3 - 0.7}{750} mA \approx 3.1mA$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = [15 - 3.1 \times (2 + 0.75)] V \approx 6.5V$$

2) 在输出特性曲线上用作图的方法求 β

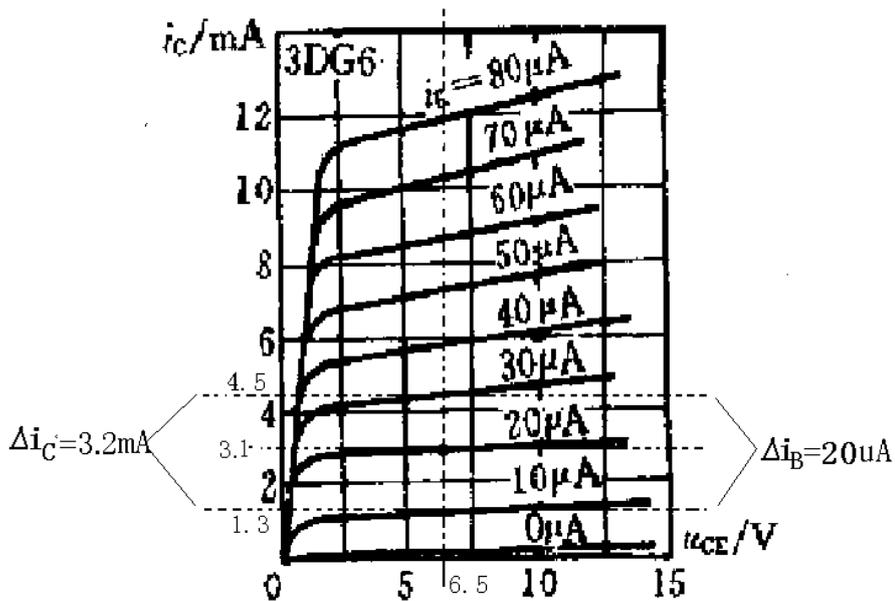
$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \approx \frac{3.2mA}{20\mu A} = 160$$

$$I_{BQ} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{3.1}{160} mA \approx 19.4\mu A \quad (\text{前述作图过程中, Q 点在 } i_B=20\mu A \text{ 输出特性曲线上})$$

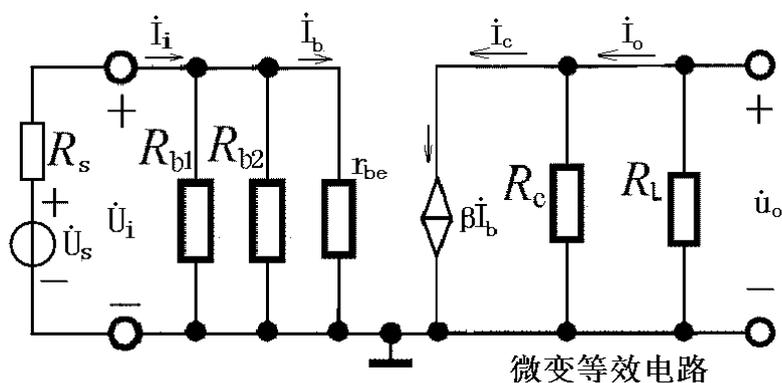
上)

3) 求三极管的输入电阻

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} = \left(300 + 161 \times \frac{26}{3.1} \right) \Omega \approx 1650.3\Omega \approx 1.65k\Omega$$



4) 微变等效电路



5) 电压放大倍数

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L \quad R'_L = R_c // R_L$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -160 \times \frac{2 // 1.5}{1.65} \approx 83.1$$

6) 输入电阻

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = 2.5 // 10 // 1.65 = 0.904 k\Omega$$

7) 输出电阻

$$R_o = R_c = 2 k\Omega$$

本题的意图是运用微变等效电路法分析典型的分压式静态工作点稳定电路。

◆ 题 2-12 上题中如 $R_s=10k\Omega$ ，则电压放大倍数

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = ?$$

解: $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \times \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \dot{A}_u = \frac{0.904}{0.904 + 10} \times (-83.1) \approx -6.9$

本题的意图是了解信号源内阻对放大倍数的影响。

◆ 题 2-13 在图 P2-13 的放大电路中，设三极管的 $\beta = 100, U_{BEQ} = -0.2V, r_{bb'} = 200\Omega$ 。

① 估算静态时的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} ；

② 计算三极管的 r_{be} 值；

③ 求出中频时的电压放大倍数 \dot{A}_u ；

④ 若输入正弦电压，输出电压波形为，试问三极管产生了截止失真还是饱和失真？应调整电路中哪个参数(增大还是减小)？

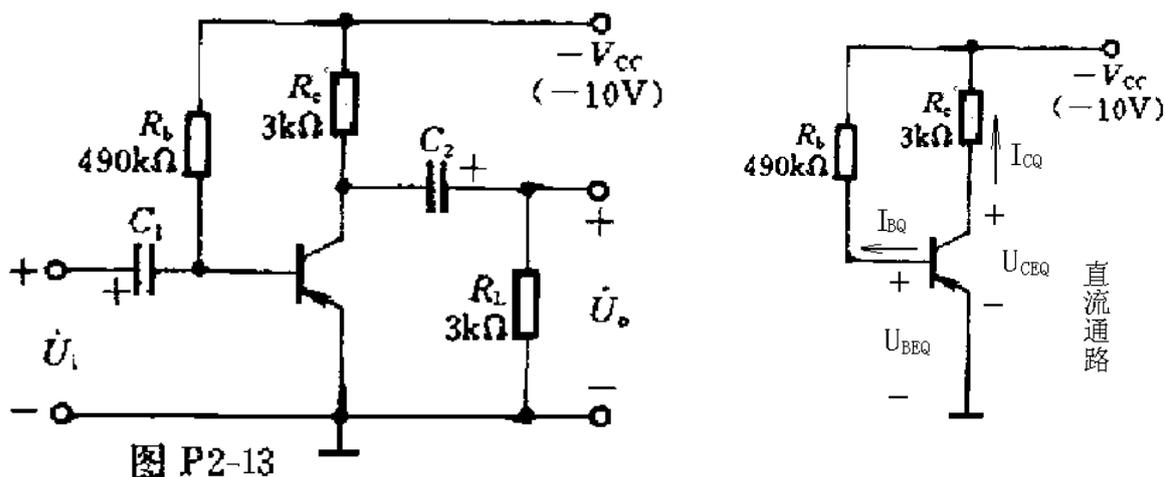


图 P2-13

解:

① 估算静态时的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ}

1) 直流通路

2) 估算 Q

$$U_{BEQ} - I_{BQ}R_b + V_{CC} = 0$$

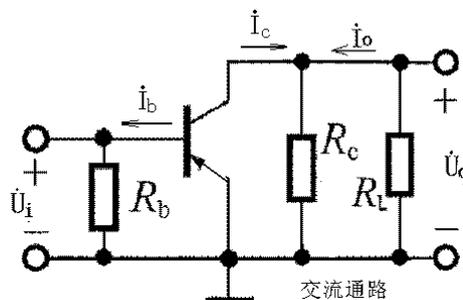
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} + U_{BEQ}}{R_b} = \frac{10 - 0.2}{490} \text{mA} = 20\mu\text{A}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 100 \times 20\mu\text{A} = 2\text{mA}$$

$$U_{CEQ} - I_{CQ}R_c + V_{CC} = 0$$

$$U_{CEQ} = -V_{CC} + I_{CQ}R_c = (-10 + 2 \times 3)\text{V} = -4\text{V}$$

② 计算三极管的 r_{be} 值



$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} = (200 + 101 \times \frac{26}{2}) \Omega = 1513 \Omega \approx 1.5k\Omega$$

③ 求出中频时的电压放大倍数 \dot{A}_u

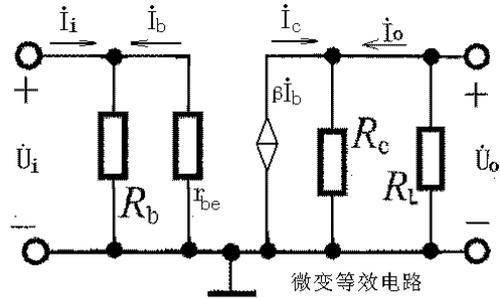
- 1) 交流通路
- 2) 微变等效电路
- 3) 电压放大倍数

$$\dot{U}_i = -\dot{I}_b r_{be}$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_c (R_c // R_L) = \beta \dot{I}_b R'_L$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta \dot{I}_b R'_L}{-\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -100 \times \frac{3 // 3}{1.5} = -100$$

4) 截止失真, 应减小 R_b 。



本题的意图是训练近似估算 Q 点和 r_{be} 的方法, 用简化 h 参数等效电路分析 \dot{A}_u , 以及了解 PNP 三极管放大电路的真波形失真。

◆ 题 2-14 在图 P2-14 的电路中, 设 $\beta = 50, U_{BEQ} = 0.6V$ 。

- ① 求静态工作点;
- ② 画出放大电路的微变等效电路;
- ③ 求电压放大倍数 \dot{A}_u , 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

解:

- ① 1) 直流通路
- 2) 计算 Q

$$I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e = V_{CC}$$

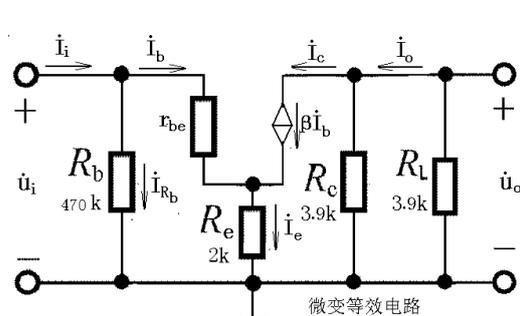
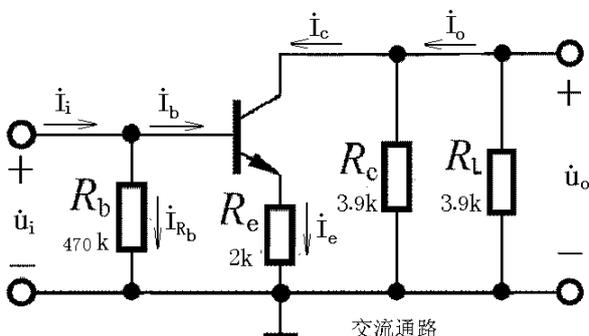
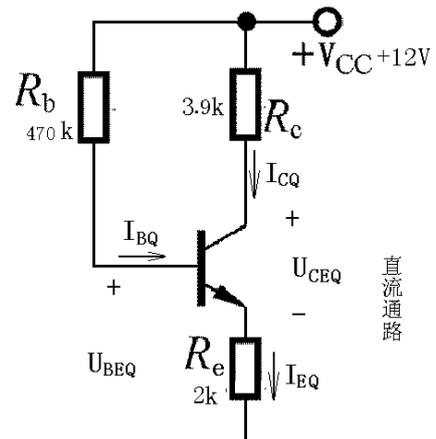
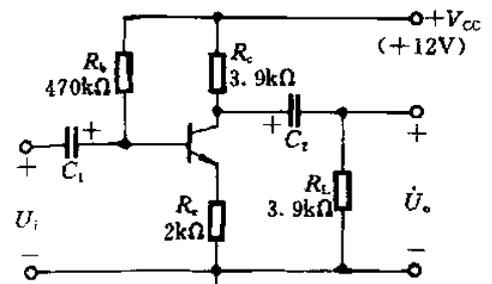
$$I_{BQ} R_b + (1 + \beta) I_{BQ} R_e = V_{CC} - U_{BEQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e} = \frac{12 - 0.6}{470 + 51 \times 2} \mu A \approx 20 \mu A$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 50 \times 20 \mu A = 1mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \\ \approx [12 + 1 \times (3.9 + 2)] V = 6.1V$$

- ② 1) 交流通路
- 2) 微变等效电路



$$\textcircled{3} \quad 1) \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} = (300 + 51 \times \frac{26}{1}) \Omega = 1626 \Omega \approx 1.6k\Omega$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_e = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$2) \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = -\beta \frac{(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} = -50 \times \frac{(3.9 // 3.9)}{1.6 + (1 + 50) \times 2} \approx -0.94$$

3) 三极管基极对地间的等效电阻

$$R'_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta) R_e = [1.6 + (1 + 50) \times 2] k\Omega = 103.6 k\Omega$$

放大电路的输入电阻

$$R_i = R_b // R'_i = (470 // 103.6) k\Omega \approx 84.9 k\Omega$$

4) 放大电路的输出电阻

$$R_o = R_c = 3.9 k\Omega$$

本题的意图是以接有发射极电阻 R_e 的放大电路为对象，训练静态分析和动态分析的基本方法。

◆ 2-15 设图 P2-15 中三极管的 $\beta = 100, U_{BEQ} = 0.6V, r_{bb'} = 100 \Omega, V_{CC} = 10V, R_c = 3k\Omega, R_F = 200 \Omega, R_{b1} = 33k\Omega, R_{b2} = 100k\Omega, \text{负载电阻 } R_L = 3k\Omega, \text{电容 } C_1, C_2 \text{ 和 } C_0 \text{ 足够大。}$

① 求静态工作点；

② 画出微变等效电路；

$$\textcircled{3} \quad \text{求 } A = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i};$$

$$\textcircled{4} \quad \text{设 } R_s = 4k\Omega, \text{求 } A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s};$$

⑤ 求 R_i 和 R_o 。

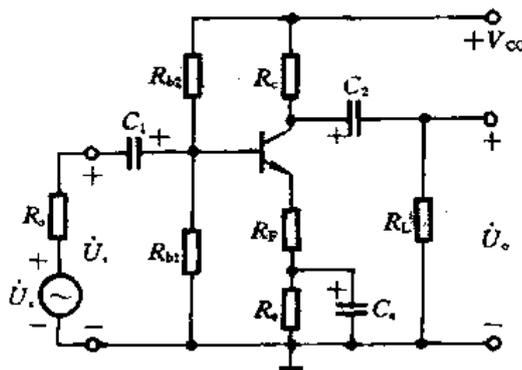


图 P2-15

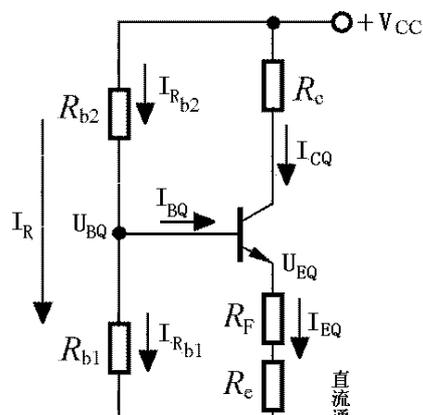
解：

①

1) 直流通路

2) 估算 Q

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} = (\frac{33}{33 + 100} \times 10) V \approx 2.48V$$



$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e + R_F} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e + R_F}$$

$$= \frac{2.48 - 0.6}{1.8 + 0.2} \text{mA} = 0.94 \text{mA}$$

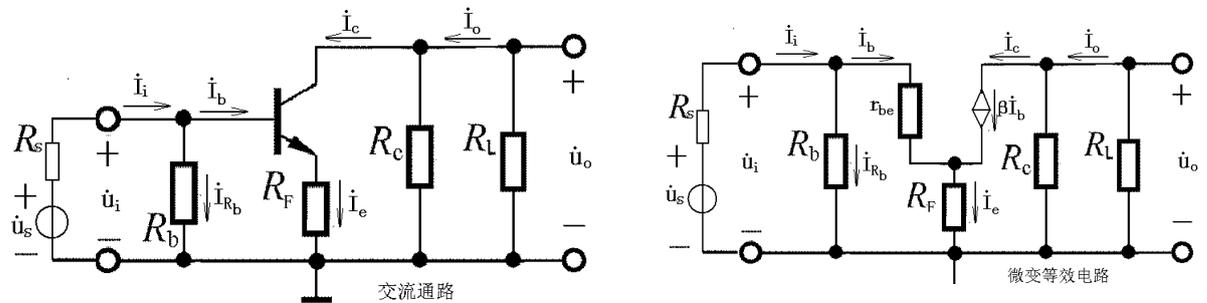
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}(R_e + R_F) \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_e + R_F)$$

$$= [10 - 0.94 \times (3 + 1.8 + 0.2)] \text{V} = 5.3 \text{V}$$

②

1) 交流通路 2) 微变等效电路

$$\text{图中 } R_b = R_{b1} // R_{b2} = \frac{R_{b1} \times R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{33 \times 100}{33 + 100} \text{k}\Omega \approx 24.8 \text{k}\Omega$$



③

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} = [100 + (1 + 100) \frac{26}{0.94}] \Omega \approx 2893.62 \Omega \approx 2.9 \text{k}\Omega$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_F = [r_{be} + (1 + \beta) R_F] \dot{I}_b \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_c R_L' = -\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_F} = -100 \times \frac{3 \times 3}{2.9 + (1 + 100) \times 0.2} \approx -6.5$$

④

$$R_i' = \dot{U}_i / \dot{I}_b = r_{be} + (1 + \beta) R_F$$

$$R_i = R_b // R_i' = R_b // [r_{be} + (1 + \beta) R_F] = \frac{R_b \times [r_{be} + (1 + \beta) R_F]}{R_b + [r_{be} + (1 + \beta) R_F]}$$

$$= \frac{24.8 \times (2.9 + 101 \times 0.2)}{24.8 + 2.9 + 101 \times 0.2} \text{k}\Omega \approx 12 \text{k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 3 \text{k}\Omega$$

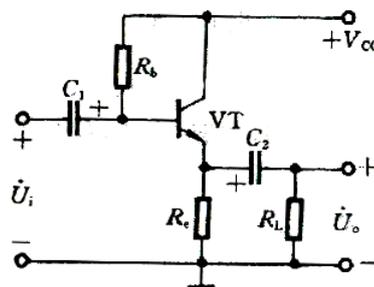
⑤

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \times \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \times \dot{A}_u = \frac{12}{12 + 4} \times (-6.5) = -4.875 \approx -4.9$$

本题的意图是在上题的基础上考虑两个发射极电阻中有一个接有旁路电容的情况。

◆ 题 2-16 在图 P2-16 所示的射极输出器电路中，设三极管的 $\beta = 100, V_{CC} = 12V, R_c = 5.6k\Omega, R_b = 560k\Omega$ 。

- ① 求静态工作点；
- ② 分别求出当 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 1.2k\Omega$ 时的 A_u ；
- ③ 分别求出当 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 1.2k\Omega$ 时的 R_i ；
- ④ 求 R_o 。



解：

- ① 1) 直流通路
- 2) 估算 Q

$$I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + I_{EQ}R_e = V_{CC}$$

$$I_{BQ}R_b + (1 + \beta)I_{BQ}R_e = V_{CC} - U_{BEQ}$$

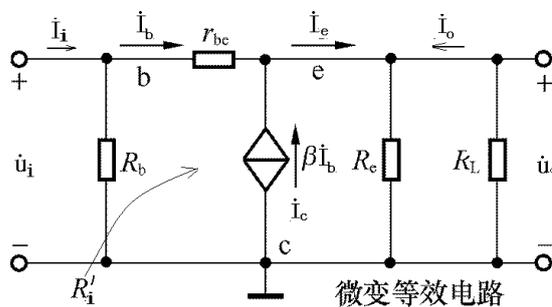
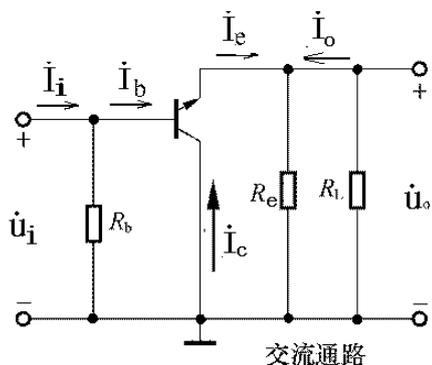
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e} = \frac{12 - 0.7}{560 + (1 + 100) \times 5.6} \text{ mA} \approx 0.01 \text{ mA} = 10 \mu\text{A}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 100 \times 10 \mu\text{A} = 1 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e \approx V_{CC} - I_{CQ}R_e = (12 - 1 \times 5.6) \text{ V} = 6.4 \text{ V}$$

②

- 1) 交流通路
- 2) 微变等效电路



$$3) r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ (mV)}}{I_{EQ}} = [300 + (1 + 100) \frac{26}{1}] \Omega \approx 2926 \Omega \approx 2.9 \text{ k}\Omega$$

4) 求 $R_L = \infty$ 时的 A_u

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R_e = (1 + \beta) \dot{I}_b R_e$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R_e}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = \frac{(1 + \beta) R_e}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} = \frac{(1 + 100) \times 5.6}{2.9 + (1 + 100) \times 5.6} \approx 0.99$$

5) 求 $R_L = 1.2k\Omega$ 时的 \dot{A}_u

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e (R_e // R_L) = (1 + \beta) \dot{I}_b (R_e // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e (R_e // R_L) = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L)]$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b (R_e // R_L)}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L)]} = \frac{(1 + \beta) (R_e + R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) (R_e + R_L)} = \frac{(1 + 100) \times (5.6 // 1.2)}{2.9 + (1 + 100) \times (5.6 // 1.2)} \approx 0.97$$

由上可见, 当 R_L 变化时, 对射极输出器的电压放大倍数影响不大, 即射极输出器具有较强的带负载能力。

6) 求 $R_L = \infty$ 时的 R_i

$$R_i' = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta) R_e = [2.9 + (1 + 100) \times 5.6] k\Omega = 568.5 k\Omega$$

$$R_i = R_b // R_i' = (560 // 568.5) k\Omega \approx 282 k\Omega$$

7) 求 $R_L = 1.2k\Omega$ 时的 R_i

$$R_i' = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L) = [2.9 + (1 + 100) \times (5.6 // 1.2)] k\Omega \approx 102.7 k\Omega$$

$$R_i = R_b // R_i' = (560 // 102.7) k\Omega \approx 86.8 k\Omega$$

可见, 当输出端 R_L 变化时, 对射极输出器输入端的 R_i 也有影响。

④

不考虑 R_e 时, $\dot{I}_o = -\dot{I}_e = -(1 + \beta) \dot{I}_b$, 而 $\dot{U}_o = -\dot{I}_b r_{be}$, 则

$$R_o' = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{r_{be}}{1 + \beta} = \frac{2.9}{1 + 100} k\Omega \approx 28.7 k\Omega$$

$$\text{考虑 } R_e \text{ 时, } R_o = R_e // R_o' \approx R_o' = 28.7 \Omega$$

本题的主要意图是对射极输出器的静态和动态分析的基本训练, 并考虑 R_L 变化对 \dot{A}_u 和 R_i 的影响。

◆ 题 2-17 画出图 P2-17 放大电路的微变等效电路, 写出计算电压放大倍数 $\frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i}$ 和 $\frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_i}$ 的表述式,

并画出当 $R_c=R_e$ 时的两个输出电压 u_{o1} 和 u_{o2} 的波形(与正弦波 u_i 相对应)。

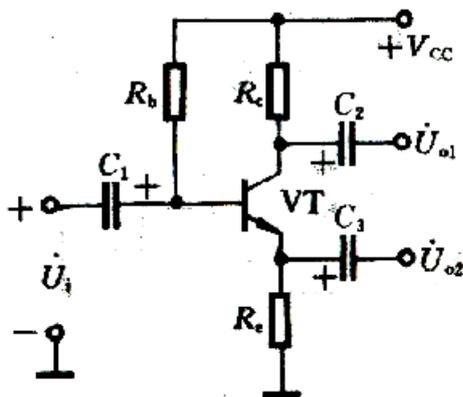
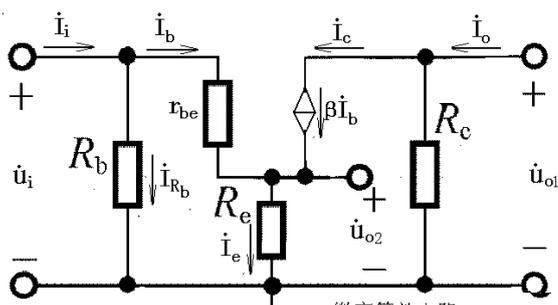
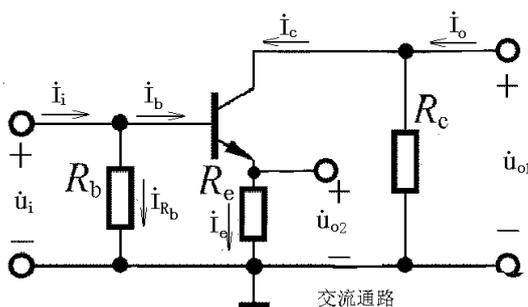


图 P2-17

解: 1) 交流通路 2) 微变等效电路



3) 求两个电压放大倍数

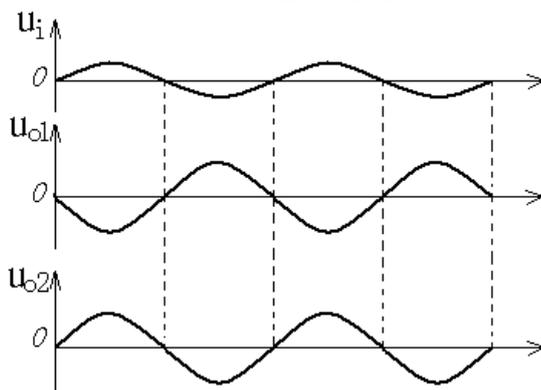
$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$\dot{U}_{o1} = -\dot{I}_c R_c = -\beta \dot{I}_b R_c$$

$$\dot{U}_{o2} = \dot{I}_e R_e = (1 + \beta) \dot{I}_b R_e$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) R_e}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$



4) 当 R_c 等于 R_e 时, $|\dot{A}_{u1}| \approx |\dot{A}_{u2}|$, 即 $\dot{U}_{o1} \approx -\dot{U}_{o2}$, u_{o1} 、 u_{o2} 的波形如图所示。

本题的意图是说明本电路的集电极和发射极可以输出两个幅值相等, 相位相反的信号。

◆ 题 2-18 在图 P2-18 所示放大电路中, 已知三极管的 $\beta = 50$, $U_{BEQ} = 0.6V$, $r_{bb'} = 300\Omega$,

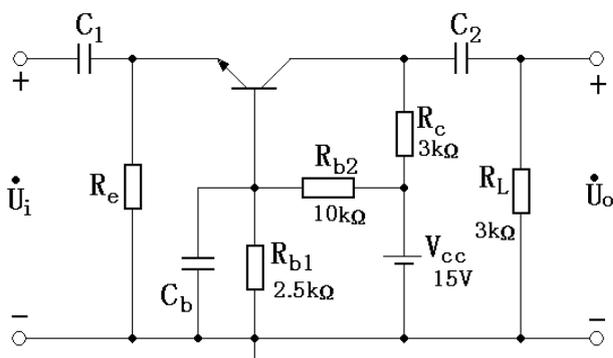


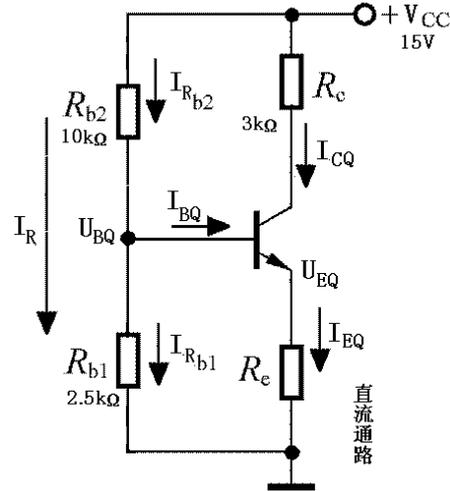
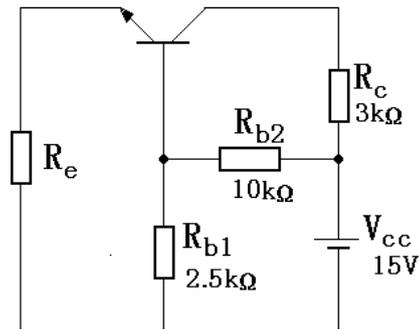
图 P2-18

- ① 若要求 $I_{EQ}=2\text{mA}$, 则发射极电阻 R_e 应选多大?
- ② 在所选的 R_e 之下, 估算 I_{BQ} 和 U_{CEQ} 等于多少?
- ③ 估算 A_u 、 R_i 和 R_o 。

解:

①

1) 直流通路



$$2) I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} = \frac{\frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$R_e = \frac{\frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - U_{BEQ}}{I_{EQ}} = \frac{\frac{2.5}{2.5 + 10} \times 15 - 0.6}{2} \text{ k}\Omega = 1.2 \text{ k}\Omega$$

②

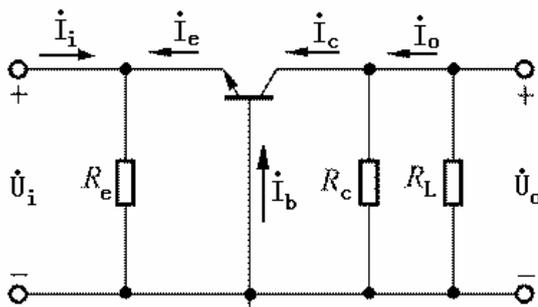
$$I_{BQ} \approx \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = \frac{2}{1 + 50} \text{ mA} \approx 0.04 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \approx V_{CC} - I_{EQ} (R_c + R_e) = [15 - 2 \times (3 + 1.2)] \text{ V} = 6.6 \text{ V}$$

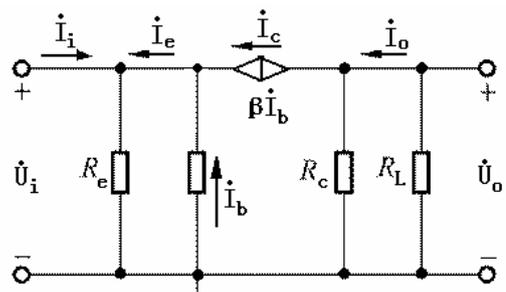
③

1) 交流通路

2) 微变等效电路



交流通路



微变等效电路

$$3) r_{be} \approx r_{bb} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}} = [300 + (1 + 50) \frac{26}{2}] \Omega = 963 \Omega = 0.963 k\Omega$$

$$4) \begin{aligned} \dot{U}_i &= -\dot{I}_b r_{be} \\ \dot{U}_o &= -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L) \end{aligned}$$

$$\dot{A}_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i = \frac{\beta (R_c // R_L)}{r_{be}} = \frac{50 \times (3 // 3)}{0.963} \approx 77.9$$

$$5) R'_i = \dot{U}_i / \dot{I}_i = \frac{-\dot{I}_b r_{be}}{-(1 + \beta) \dot{I}_b} = \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad \text{不考虑 } R_e \text{ 时}$$

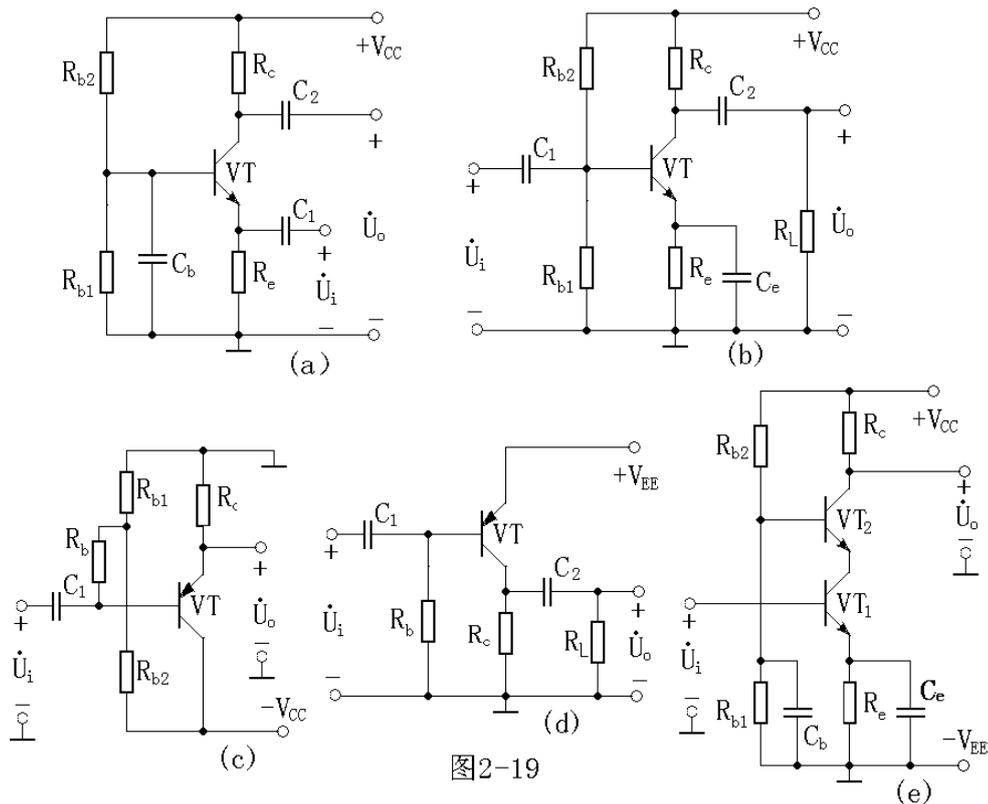
而考虑 R_e 时，

$$R_i = R_e // R'_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta} = (1.2 // \frac{0.963}{1 + 50}) k\Omega \approx (1.2 // 0.019) k\Omega \approx 0.0187 k\Omega \approx 18.7 \Omega$$

$$6) R_o \approx R_c = 3 k\Omega$$

本题的意图是对共基极放大电路的静态和动态分析进行基本训练。

◆ **题 2-19** 试判断图 2-19 中的各个放大电路属于三种基本组态中的哪一种，或由哪两种组态组成的串接级。



解:

- a) 共基组态; b) 共射组态; c) 共集组态; d) 共射组态; e) 共射-共基组态。

本题的意图是练习分析各种电路属于何种组态

◆ 题 2-20 在图 P2-20(a) 所示的放大电路中, 场效应管的漏极特性曲线如图(b)所示, $V_{DD}=20V$, $V_{GG}=2V$, $R_d=5.1k\Omega$, $R_g=10M\Omega$ 。

- ① 试用图解法确定静态工作点 Q;
- ② 由特性曲线求出跨导 g_m ;
- ③ 估算电压放大倍数 A_u 和输出电阻 R_0 。

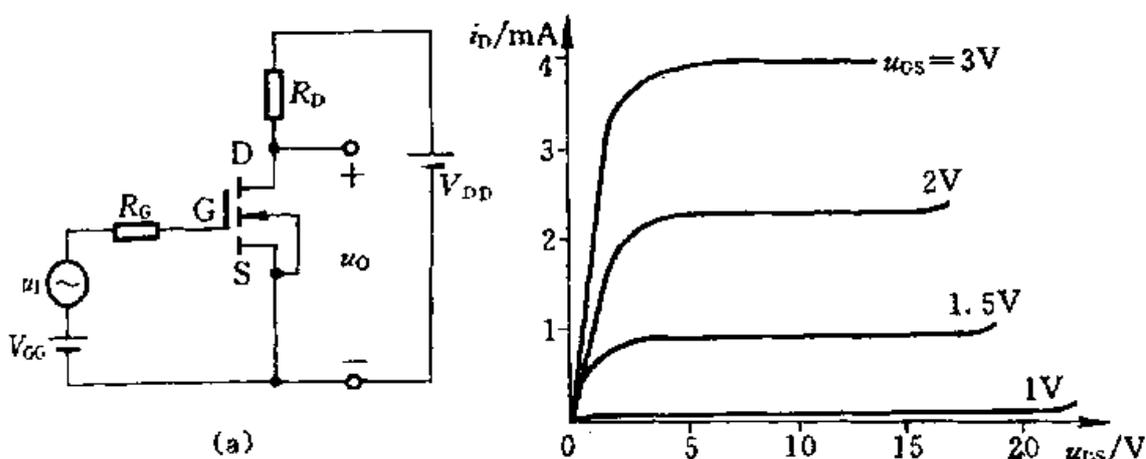


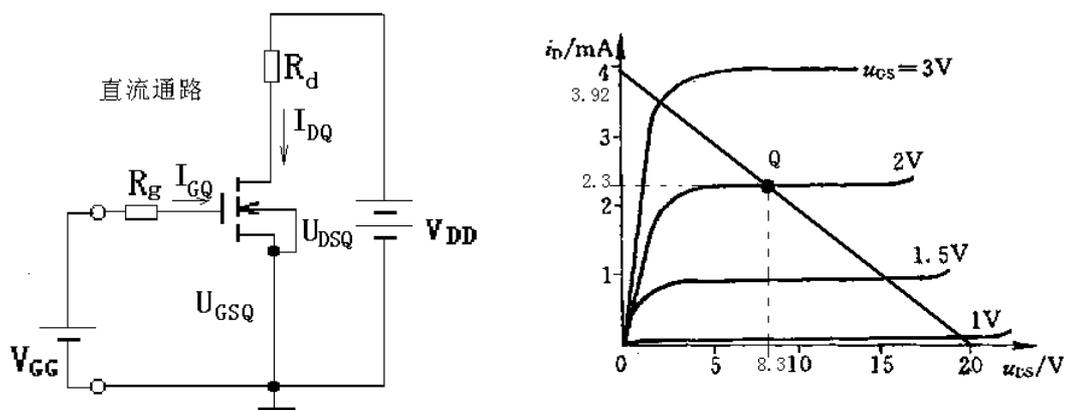
图 P2-20 (b)

解: ①

改电路的直流通路如图所示, 据此可得直流负载线方程: $u_{DS} = V_{DD} - i_D R_d = 20 - 5.1i_D$

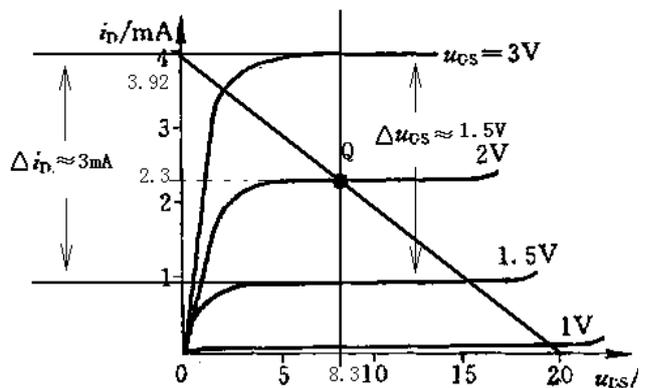
在输出特性曲线上, 直流负载线与 $u_{GS}=2V$ 的输出特性曲线的交点即为 Q, 有图可得:

$$U_{GSQ} = 2V, I_{DQ} = 2.3mA, U_{DSQ} = 8.3V。$$



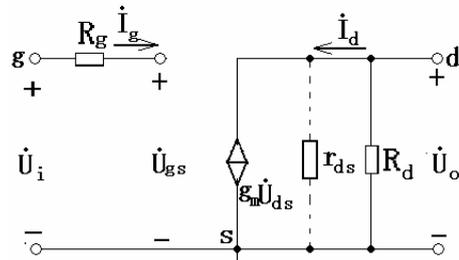
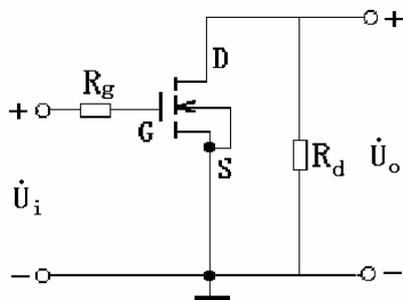
② 由图可知:

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \approx (3/1.5)mS = 2mS$$



③

1) 交流通路 2) 微变等效电路



3) 电压放大倍数

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_d R_d = -g_m \dot{U}_{gs} R_d \quad A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m R_d = -(2 \times 5.1) = -10.2$$

4) 输出电阻

$$R_o = R_d // r_{ds} \approx R_d = 5.1k\Omega$$

本题的意图是训练用图解法分析最基本的共源极放大电路的 Q 点和 FET 的 g_m , 并用微变等效电路法分析电压放大倍数和输出电阻。

◆ 题 2-21 在图 P2-21 所示的放大电路中, $V_{DD}=30V$, $R_D=15k\Omega$, $R_S=1k\Omega$, $R_G=20M\Omega$, $R_1=30k\Omega$, $R_2=200k\Omega$, 负载电阻 $R_L=1M\Omega$, 场效应管的跨导 $g_m=1.5mS$ 。

① 试估算电压放大倍数 A_u 和输入、输出电阻 R_i 、 R_o ;

② 如果不接旁路电容 C_S , 则 $A_u = ?$

解:

①

1) 交流通路 2) 微变等效电路

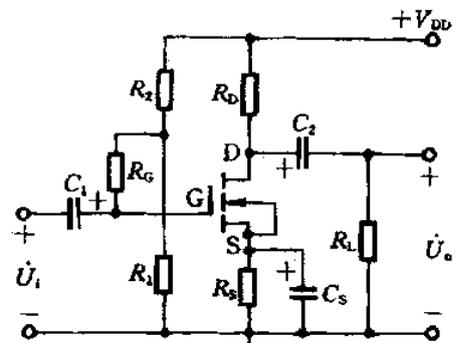
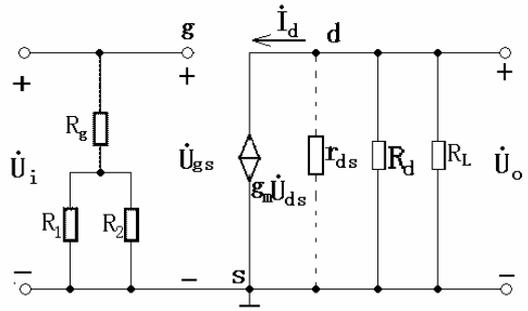
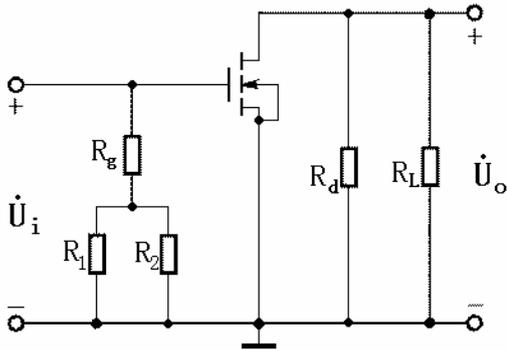


图 P2-21



3) 电压放大倍数

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_d // R_L) = -g_m \dot{U}_{gs} (R_d // R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m (R_d // R_L) = -1.5 \times \frac{15 \times 1000}{15 + 1000} \approx -22.2$$

4) 输入电阻

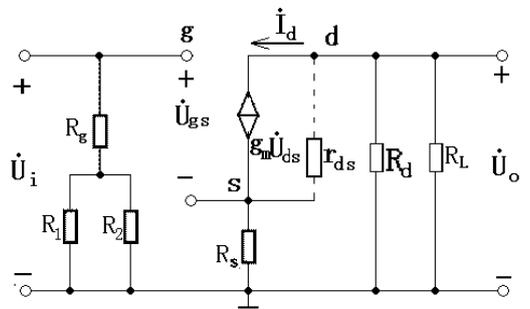
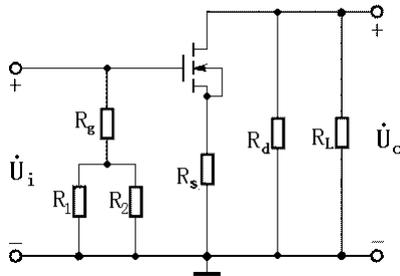
$$R_i = R_g + (R_1 // R_2) \approx R_g = 20 M\Omega$$

5) 输出电阻

$$R_o = R_d = 15 k\Omega$$

②

1) 交流通路 2) 微变等效电路



3) 电压放大倍数

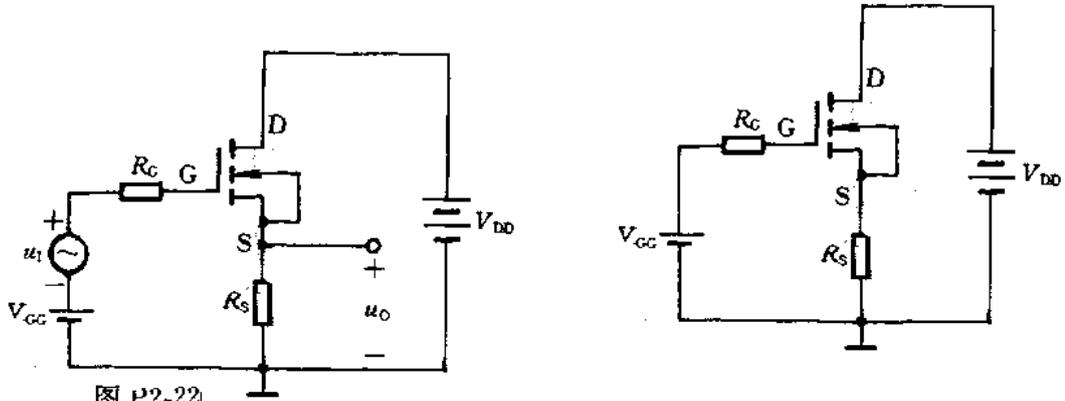
$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{I}_d R_s = \dot{U}_{gs} (1 + g_m R_s) \quad \dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_d // R_L) = -g_m \dot{U}_{gs} (R_d // R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{g_m (R_d // R_L)}{1 + g_m R_s} = -\frac{1.5 \times \frac{15 \times 1000}{15 + 1000}}{1 + 1.5 \times 1} \approx -8.9$$

本题的意图是训练用微变等效电路法分析分压-自偏压式共源放大电路的 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o ，并了解源极旁路电容 C_S 对 \dot{A}_u 的影响。

?? ? ◆ 题 2-22 在图 P2-22 所示的源极输出器电路中, 已知 N 沟道增强型 MOS 场效应管的开启电压 $U_{GS(th)}=2V$, $I_{D0}=2mA$, $V_{DD}=20V$, $V_{GG}=4V$, $R_S=4.7k\Omega$, $R_0=1M\Omega$ 。

- ① 试估算静态工作点;
- ② 估算场效应管的跨导 g_m ;
- ③ 估算电压放大倍数 A_u 和输出电阻 R_0 。



解:

图 P2-22

①

1) 直流通路

2) 根据直流通路可列写以 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 为未知量的方程组:

$$\begin{cases} U_{GSQ} = V_{GG} - I_{DQ}R_S \\ I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \end{cases}$$

代入已知量, 解之得:

$$\begin{cases} U_{GSQ} = 0.85V \\ I_{DQ} = 0.67mA \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} U_{GSQ} = 2.73V \\ I_{DQ} = 0.27mA \end{cases}$$

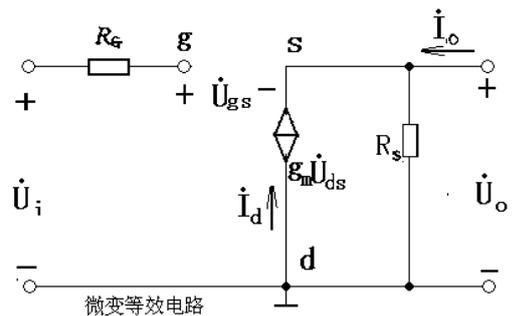
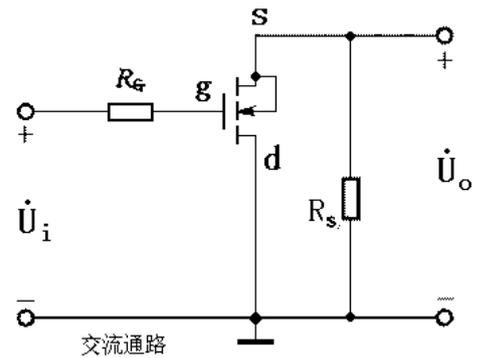
前一组解不合理, 取第二组结果。可进一步求出:

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_S = (20 - 4.7 \times 0.27)V \approx 18.8V$$

$$\textcircled{2} \quad g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0}I_{DQ}} = \left(\frac{2}{2} \sqrt{2 \times 0.27} \right) mS = 0.73 mS$$

③

1) 交流通路 2) 微变等效电路



3) 电压放大倍数

$$\dot{U}_o = \dot{I}_d R_S = g_m \dot{U}_{gs} R_S$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o = (1 + g_m R_S) \dot{U}_{gs}$$

$$\dot{A}_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = \frac{0.73 \times 4.7}{1 + 0.73 \times 4.7} \approx 0.77$$

4) 求输出电阻

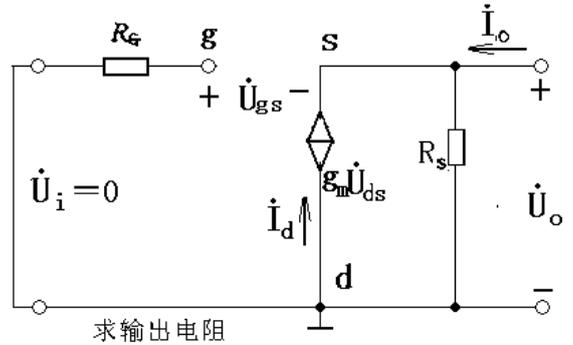
求输出电阻时的微变等效电路如图所示, 则

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_S} - g_m \dot{U}_{gs}$$

$$= \frac{\dot{U}_o}{R_S} + g_m \dot{U}_o = \left(\frac{1}{R_S} + g_m \right) \dot{U}_o$$

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{1}{g_m + 1/R_S}$$

$$= \frac{1}{g_m} // R_S = \left(\frac{1}{0.73} // 4.7 \right) k\Omega \approx 1.1 k\Omega$$



本题的意图的是训练用估算法求源极输出器的 Q 点和 FET 的 g_m , 并用微变等效电路法求 \dot{A}_u 和

R_o 。

◆ 题 2-23 假设在图 P2-23 所示的两极直接耦合放大电路中, $V_{CC}=15V$, $R_{b1}=360k\Omega$, $R_{c1}=5.6k\Omega$, $R_{c2}=2k\Omega$, $R_{e2}=750\Omega$, 两个三极管的电流放大系数为 $\beta_1=50$, $\beta_2=30$, 要求:

① 估算放大电路的静态工作点;

② 估算总的电压放大倍数 $A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i}$ 和输入、输出电阻 R_i 、 R_o 。

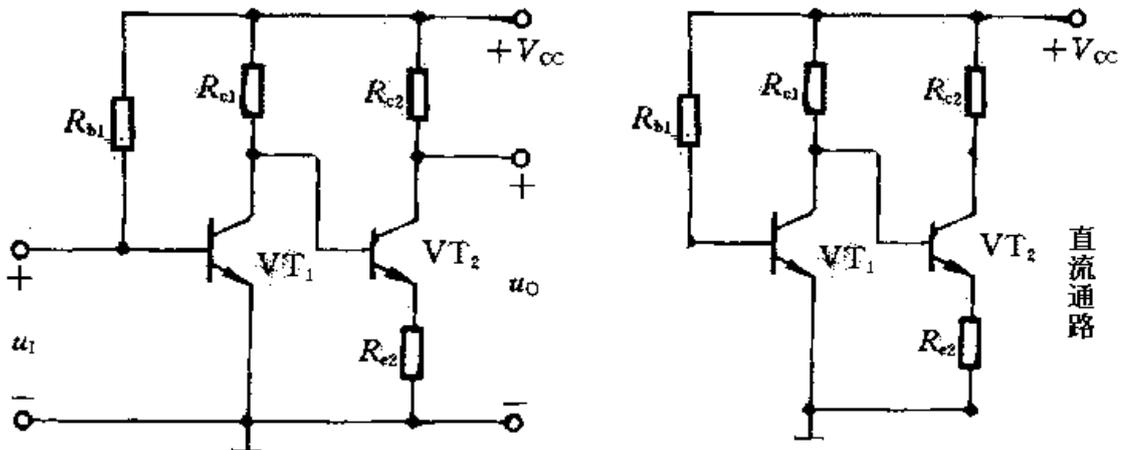


图 P2-23

解:

①

1) 直流通路 2) 估算 Q

$$\text{设 } U_{BEQ1} = U_{BEQ2} = 0.7V, \text{ 可算得 } I_{BQ1} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ1}}{R_{b1}} = \frac{15 - 0.7}{360} mA \approx 0.04 mA,$$

$I_{EQ1} = I_{CQ1} = \beta_1 I_{BQ1} = 50 \times 0.04 mA = 2 mA$, 暂先假设 $I_{BQ2} \ll I_{CQ1}$, 可算得

$$U_{CEQ1} = V_{CC} - I_{CQ1}R_{c1} = (15 - 2 \times 5.6)V = 3.8V$$

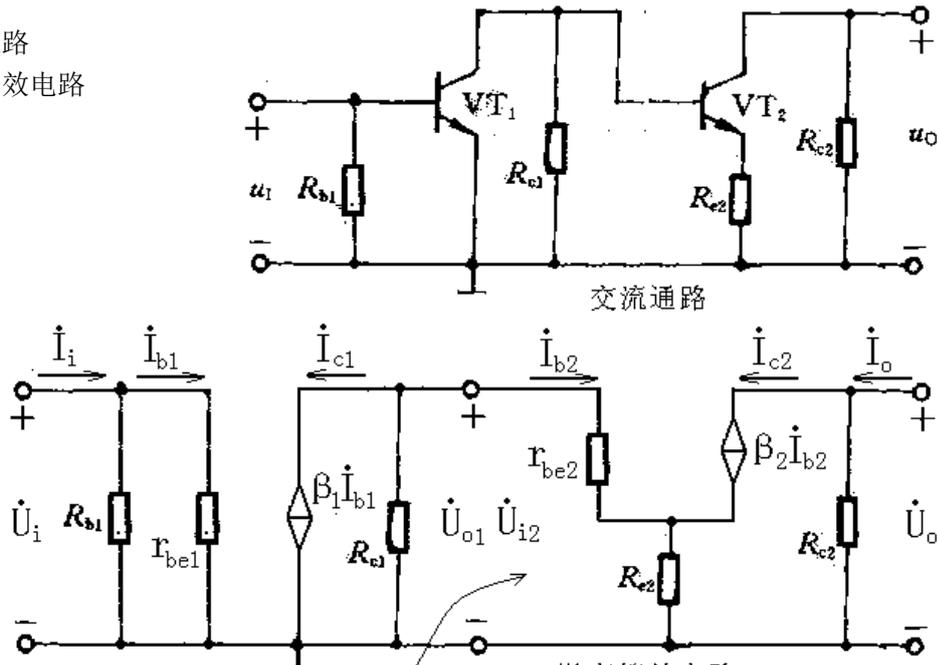
$$I_{CQ2} \approx I_{EQ2} = \frac{U_{CEQ1} - U_{BEQ2}}{R_{e2}} = \frac{3.8 - 0.7}{750} A \approx 4.1mA, \quad I_{BQ2} = I_{CQ2} / \beta_2 = \frac{4.1}{30} mA = 0.14mA. \text{ 可见}$$

以上 $I_{BQ2} \ll I_{CQ1}$ 假设成立。则可算得

$$U_{CEQ2} = V_{CC} - I_{CQ2}R_{c2} - I_{EQ2}R_{e2} \approx V_{CC} - I_{CQ2}(R_{c2} + R_{e2}) = [15 - 4.1 \times (2 + 0.75)]V \approx 3.7V.$$

②

- 1) 交流通路
- 2) 微变等效电路



$$3) \quad r_{be1} = r_{bb'} + (1 + \beta_1) \frac{26mV}{I_{EQ1}} = [300 + (1 + 50) \frac{26}{2}] \Omega \approx 0.96k\Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta_2) \frac{26mV}{I_{EQ2}} = [300 + (1 + 30) \frac{26}{4.1}] \Omega \approx 0.5k\Omega$$

$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2} = [0.5 + (1 + 30) \times 0.85]k\Omega \approx 23.8k\Omega$$

$$4) \quad \dot{A}_{u1} = -\beta_1 \frac{R_{c1} // R_{i2}}{r_{be1}} = -50 \times \frac{5.6 // 23.8}{0.96} \approx -236$$

$$\dot{A}_{u2} = -\beta_2 \frac{R_{c2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}} = -30 \times \frac{2}{0.5 + (1 + 30) \times 0.75} \approx -2.5$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} = (-236) \times (-2.5) = 590$$

$$5) \quad R_i = R_{b1} // r_{be1} \approx r_{be1} = 0.96k\Omega$$

?? ? 6) $R_o = R_{c2} = 2k\Omega$

本题的意图是练习估算直接耦合两级放大电路的Q点和 \dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 。

◆ 题 2-24 图 P2-24 是由 NPN 和 PNP 三极管组成的双电源直接耦合放大电路，设三极管的 $\beta_1 = 40$, $\beta_2 = 20$, $U_{BEQ1} = U_{BEQ2} = 0.7V$, $V_{CC} = V_{EE} = 12V$, $R_{c1} = 3.9k\Omega$, $R_s = 200\Omega$, $R_{c2} = 3.3k\Omega$, $R_{e2} = 2k\Omega$, 假设当外加输入信号 $u_s = 0$ 时输出电压 $u_o = 0$, 要求:

① 估算当 $u_o = 0$ 时电路中各处的电流和电压值;

② 估算总的电压放大倍数 $A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i}$ 和输入、

输出电阻 R_i 、 R_o 。

解:

① 由于 $u_o = 0$, 故

$$I_{EQ2} \approx I_{CQ2} = \frac{V_{EE}}{R_{e2}} = \frac{12}{3.3} mA \approx 3.6 mA$$

$$I_{BQ2} = \frac{I_{CQ2}}{\beta_2} = \frac{3.6}{20} mA = 0.18 mA$$

$$I_{R_{c1}} \approx \frac{I_{EQ2} R_{e2} + U_{EB2}}{R_{c1}} = \frac{3.6 \times 2 + 0.7}{3.9} mA \approx 2 mA$$

$$I_{CQ1} = I_{R_{c1}} + I_{BQ2} = (2 + 0.18) mA \approx 2.2 mA$$

$$I_{BQ1} = \frac{I_{CQ1}}{\beta_1} = \frac{2.2}{40} mA = 0.055 mA$$

$$U_{CQ1} = V_{CC} - I_{R_{c1}} R_{c1} = (12 - 2 \times 3.9) V = 4.2 V$$

②

1) 交流通路

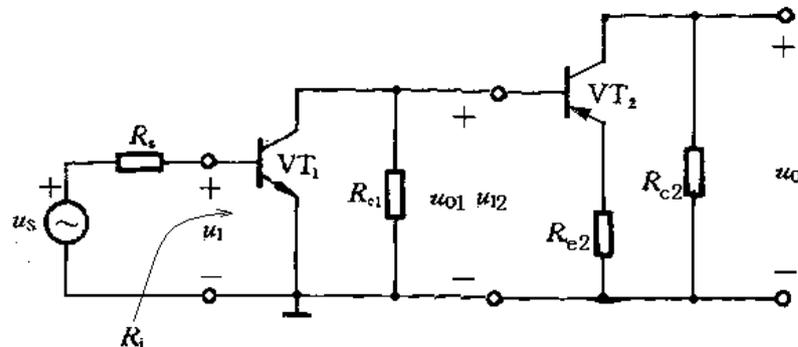


图 P2-24

2) $r_{be1} = r_{bb'} + \frac{26(mV)}{I_{BQ1}} = (300 + \frac{26}{0.055}) \Omega \approx 773 \Omega \approx 0.77 k\Omega$

$$r_{be2} = r_{bb'} + \frac{26(mV)}{I_{BQ2}} = (300 + \frac{26}{0.18})\Omega \approx 444\Omega \approx 0.44k\Omega$$

$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2} = (0.44 + 21 \times 2)k\Omega = 42.4k\Omega$$

$$3) \dot{A}_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = -\beta_1 \frac{R_{c1} // R_{i2}}{r_{be1}} = -40 \times \frac{3.9 // 42.4}{0.77} \approx -186$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = -\beta_2 \frac{R_{c2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}} = -20 \times \frac{3.3}{0.44 + (20 + 1) \times 2} \approx -1.56$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \times \dot{A}_{u2} = (-186) \times (-1.56) \approx 290$$

$$4) R_i = r_{be1} = 0.77k\Omega$$

$$5) R_o = R_{c2} = 3.3k\Omega$$

本题的意图是练习 NPN-PNP 直接耦合放大电路的估算方法。

◆ 题 2-25 设图 P2-25 电路中三极管的 β 均为 100, 且 $r_{be1} = 5.6k\Omega$, $r_{be2} = 6.2k\Omega$ 。

① 试估算 R_i 和 R_o ;

② 设 $R_L = \infty$, 分别求出当 $R_S = 0$ 和 $R_S = 20k\Omega$ 时的 \dot{A}_{us} ;

③ 当 $R_S = 20k\Omega$ 时, 如果去掉 $\dot{A}_u < 1$ 的射极输出器, 而将 \dot{U}_S 和 R_S 直接加在第二级的输入端,

此时 $\dot{A}_{us} = ?$ 试与第②问的结果进行比较。

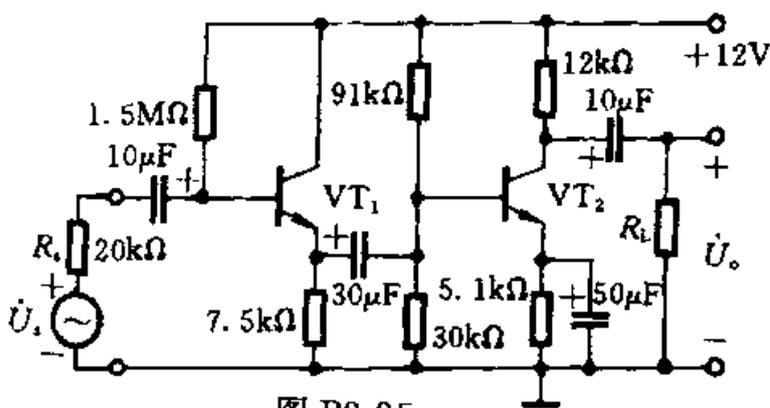


图 P2-25

解:

$$\textcircled{1} R_i' = r_{be1} + (1 + \beta_1)R_{e1}' = r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_{e1} // R_{b21} // R_{b22} // r_{be2})$$

$$= [5.6 + 101 \times (7.5 // 30 // 91 // 6.2)]k\Omega = 303.6k\Omega$$

$$R_i = R_{b1} // R_i' = (1500 // 303.6)k\Omega = 252.5k\Omega$$

$$R_o = R_{c2} = 12k\Omega$$

②

1) 当 $R_S=0$ 时

$$\dot{A}_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)R'_{e1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{e1}} \approx \frac{298}{303.6} \approx 0.98$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\beta_2 R_{c2}}{r_{be2}} = -\frac{100 \times 12}{6.2} \approx -193.5$$

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \times \dot{A}_{u2} = 0.98 \times (-193.5) \approx -189.6$$

2) 当 $R_S=20k\Omega$ 时

$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_i + R_S} \dot{A}_u = \frac{252.5}{252.5 + 20} \times (-189.6) = -175.7$$

③ 当 $R_S=20k\Omega$ 时, 如果去掉 $\dot{A}_u < 1$ 的射极输出器, 而将 \dot{U}_S 和 R_S 直接加在第二级的输入端, 此时

$$R_i = R_{b21} // R_{b22} // r_{be2} = (30 // 91 // 6.2)k\Omega \approx 4.86k\Omega$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{4.86}{4.86 + 20} \times (-193.5) \approx -37.8$$

与第②的结果相比, 此时的 $|\dot{A}_{us}|$ 急剧减小, 可见当信号源内阻较大时, 采用射极输出器作为输入级可避免 $|\dot{A}_{us}|$ 受到严重损失。

本题的意图是训练估算多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻, 并说明在信号源内阻比较大的情况下, 采用射极输出器作为输入极的优越性。

◆ 题 2-26 设图 P2-26 电路中三极管 β 均为 100, $r_{be1}=6.2k\Omega$, $r_{be2}=1.6k\Omega$ 。

① 试估算 R_i 和 R_o ;

② 分别求出当 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 3.6k\Omega$ 时的 \dot{A}_u ;

③ 当 $R_L = 3.6k\Omega$ 时, 如果去掉 $\dot{A}_u < 1$ 的射极输出器, 将 R_L 直接接在第一级的输出端, 此时 $\dot{A}_u = ?$

试与第②问的结果进行比较。

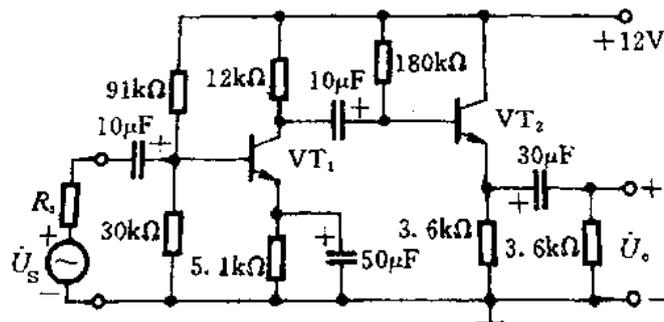


图 P2-26

解:

$$\textcircled{1} R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be1} = (30 // 91 // 6.2)k\Omega \approx 4.86k\Omega$$

$$\text{不考虑 } R_{e2}、R_L \text{ 时, } R'_o = \frac{r_{be2} + R_{b2} // R_{c1}}{1 + \beta_2} = \frac{1.6 + (12 // 180)}{1 + 100}k\Omega \approx 0.127k\Omega = 127\Omega$$

$$\text{考虑 } R_{e2}、R_L \text{ 时, } R_o = R'_o // R_{e2} // R_L = (0.127 // 3.6 // 3.6)k\Omega \approx 0.119k\Omega = 119\Omega$$

② 当 $R_L = \infty$ 时

$$R_{i2} = [r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}] // R_{b2} = [(1.6 + 101 \times 3.6) // 180]k\Omega \approx 120.6k\Omega$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \times \dot{A}_{u2} = -\beta_1 \times \frac{R_{c1} // R_{i2}}{r_{be1}} \times \frac{(1 + \beta_2)R_{e2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_{e2}} \\ &= -100 \times \frac{12 // 120.6}{6.2} \times \frac{(1 + 100) \times 3.6}{1.6 + (1 + 100) \times 3.6} \approx -176 \times 0.996 \approx -175.3 \end{aligned}$$

当 $R_L = 3.6k\Omega$ 时

$$R_{i2} = [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)] // R_{b2} = [(1.6 + 101 \times 3.6 // 3.6) // 180]k\Omega \approx 90.8k\Omega$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \times \dot{A}_{u2} = -\beta_1 \times \frac{R_{c1} // R_{i2}}{r_{be1}} \times \frac{(1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{e2} // R_L)} \\ &= -100 \times \frac{12 // 90.8}{6.2} \times \frac{(1 + 100) \times (3.6 // 3.6)}{1.6 + (1 + 100) \times (3.6 // 3.6)} \approx -170.96 \times 0.991 \approx -169.4 \end{aligned}$$

$$\textcircled{3} \dot{A}_u = -\beta_1 \times \frac{R_{c1} // R_L}{r_{be1}} = -100 \times \frac{12 // 3.6}{6.2} \approx 44.7$$

与第②问的结果进行比较, $|\dot{A}_u|$ 的结果下降很多。可见当负载电阻较小时采用射极输出器作为输出级可避免 $|\dot{A}_u|$ 衰减过多。

本题的意图是训练估算多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻, 并说明在负载电阻比较小的情况下, 常常采用射极输出器作为多级放大器的输出级以提高带负载的能力。

◆ **题 2-27** 为了测量放大电路的以下各项性能和指标, 试问需分别使用哪些。可供选用的仪器有: 直流稳压电源、万用表、正弦波信号发生器、交流毫伏表和示波器。如用万用表, 请说明使用电压挡、电流挡还是电阻挡, 直流还是交流档。

- ① 静态工作点 Q;
- ② 电压放大倍数 A_u ;
- ③ 最大输出幅度 U_{om} ;
- ④ 输入电阻 R_i ;
- ⑤ 输出电阻 R_o 。

解:

- ① 直流稳压电源、万用表（直流电压档）；
- ② 直流稳压电源、正弦波信号发生器、示波器、交流毫伏表；
- ③ ④ ⑤ 同②。

本题是实验技术题，其意图是训练根据不同的要求正确选择常用的电子仪器。

◆ 题 2-28 图 P2-28 所示为测试基本放大电路的实验安排图。试回答以下问题：

- ① 在量测输出电压 U_o 并观察其波形时，各测试仪器如何与放大电路相连接？在图上画出。
- ② 若 R_b 为 $1M\Omega$ ， $U_{BEQ}=0.7V$ ，用内阻为 $1M\Omega$ 的直流电压表测 U_{CEQ} =? 已知电源电压为 $12V$ 。
- ③ 若 U_s (正弦有效电压) 为 $10mV$ ，试计算在给定条件下，用内阻为 $1M\Omega$ 的交流电压表测输出交流电压 U_o =? 设 C_1 、 C_2 的容抗和 R_b 的分流作用均可忽略， $r_{bb'}=200\Omega$ 。
- ④ 在上题条件下，若用一个内阻为 $5k\Omega$ 的交流电压表测 U_o =?
- ⑤ 若用内阻为 $1M\Omega$ 的示波器测出 u_o 的波形如图中示波器的荧光屏上所示，在下面写出该失真现象是截止失真还是饱和失真。 R_b 应增加还是减少才能使波形接近正弦波。

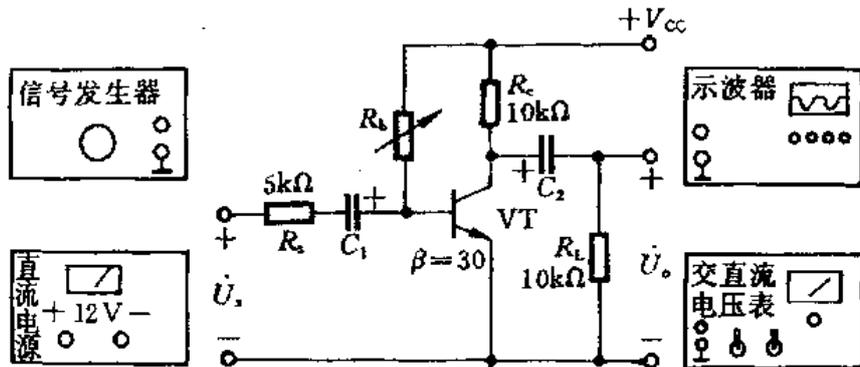
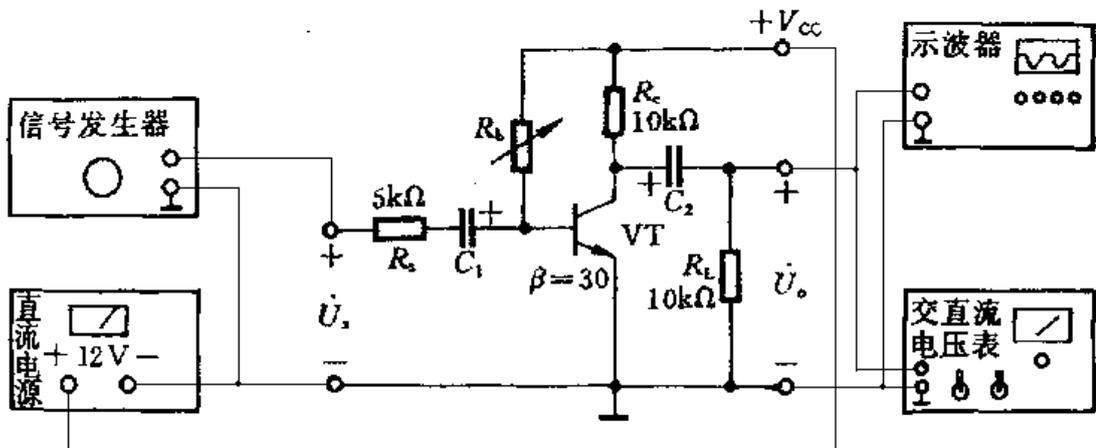


图 P2-28

解：

- ① 接法如图所示



- ② 若 R_b 为 $1M\Omega$ ， $U_{BEQ}=0.7V$ ，用内阻为 $1M\Omega$ 的直流电压表可测得 $U_{CEQ}=8.61V$ （测量误差约为 1% ）。

- ③ 若 U_s (正弦有效电压) 为 10mV , 用内阻为 $1\text{M}\Omega$ 的交流电压表可测得输出交流电压 $U_o=200\text{mV}$ (测量误差约为 0.5%)。
- ④ 若用一个内阻为 $5\text{k}\Omega$ 的交流电压表测输出电压, 可测得 $U_o=100\text{mV}$ (测量误差约为 50%)。根据以上估算可知, 测量电压时, 测量仪器得内阻越小, 测量误差越大。
- ⑤ 截止失真, R_b 应减小。

第四章 习题与思考题

◆◆ 习题 4-1 在图 P4-1 所示互补对称电路中, 已知 V_{CC} 为 6V , R_L 为 8Ω , 假设三极管的饱和管压降 $U_{CES}=1\text{V}$,

- ① 试估算电路的最大输出功率 P_{om} ;
- ② 估算电路中直流电源消耗的功率 P_V 和效率 η 。

解: ①

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{cem})^2}{2R_L} = \frac{(6-1)^2}{2 \times 8} \text{W} \approx 1.563\text{W}$$

如忽略 U_{CES} , 则

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{6^2}{2 \times 8} \text{W} = 2.25\text{W}$$

$$\textcircled{2} \quad P_V \approx \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L} = \frac{2 \times 6^2}{\pi \times 8} \text{W} \approx 2.865\text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{1.563}{2.865} \approx 54.55\%$$

$$\text{如忽略 } U_{CES}, \text{ 则 } \eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{2.25}{2.865} \approx 78.53\%$$

此题的意图是理解 OCL 互补对称放大电路的 P_{om} 和 P_V 的估算方法。

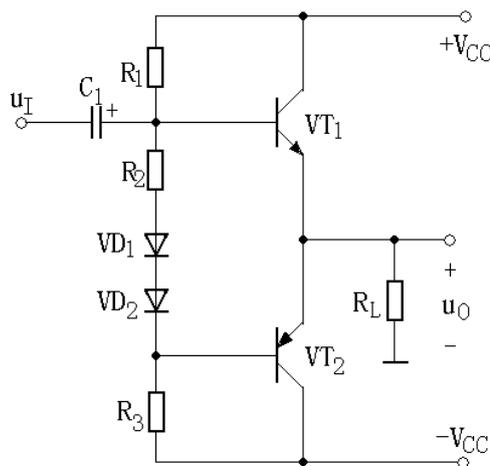


图 P4-1

◆◆ 习题 4-2 在图 P4-1 所示的电路中:

- ① 三极管的最大功耗等于多少?
- ② 流过三极管的最大集电极电流等于多少?
- ③ 三极管集电极和发射极之间承受的最大电压等于多少?
- ④ 为了在负载上得到最大输出功率 P_{om} , 输入端应加上的正弦电压有效值大约等于多少?

解: ① $P_{CM} > 0.2P_{om} = 0.2 \times 2.25\text{W} = 0.45\text{W}$

$$\textcircled{2} \quad I_{CM} > \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{6}{8} \text{A} = 0.75\text{A}$$

$$\textcircled{3} \quad U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} = 2 \times 6\text{V} = 12\text{V}$$

④ 因为互补对称电路中无论哪个三极管导电, 电路均工作在射极跟随器状态, $\dot{A}_u \approx 1$, 而略

小于 1, 故 $U_i \approx \frac{U_{cem}}{\sqrt{2}} \approx \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} = \frac{6}{\sqrt{2}}V \approx 4.24V$ 。

本题的意图是了解 OCL 互补对称电路中功率三极管极限参数的估算方法。

◆◆ 习题 4-3 在图 P4-3 所示互补对称电路中, 已知 V_{CC} 为 6V, R_L 为 8Ω , 假设三极管的饱和管压降 $U_{CES}=1V$,

- ① 估算电路的最大输出功率 P_{om} ;
- ② 估算电路中直流电源消耗的功率 P_V 和效率 η 。

将本题的估算结果与习题 4-1 进行比较。

解: ①

$$P_{om} = \frac{(V_{CC}/2 - U_{cem})^2}{2R_L} = \frac{(3-1)^2}{2 \times 8} W = 0.25W$$

如忽略 U_{CES} , 则

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{8R_L} = \frac{6^2}{8 \times 8} W = 0.5625W$$

$$\text{② } P_V \approx \frac{V_{CC}^2}{2\pi R_L} = \frac{6^2}{2\pi \times 8} W \approx 0.716W$$

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{0.25}{0.716} \approx 34.92\%$$

$$\text{如忽略 } U_{CES}, \text{ 则 } \eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{0.5625}{0.716} \approx 78.56\%$$

可见, 在同样的 V_{CC} 和 R_L 之下, OCL 电路的 P_{om} 比 OTL 电路大得多 (大约为 4 倍)。同时 OCL 电路的 P_V 也比 OTL 电路大得多 (也大致为 4 倍)。最终, 两种电路得效率基本相同。

此题的意图是理解 OTL 互补对称放大电路的 P_{om} 和 P_V 的估算方法, 并与 OCL 电路进行比较。

◆◆ 习题 4-4 在图 P4-3 所示的电路中:

- ① 估算三极管的最大功耗;
- ② 估算三极管的最大集电极电流;
- ③ 估算三极管集电极和发射极之间承受的最大电压;
- ④ 为了在负载上得到最大输出功率 P_{om} , 输入端应加上的正弦电压有效值等于多少?

解: ① $P_{CM} > 0.2P_{om} = 0.2 \times 0.5625W = 0.1125W$

$$\text{② } I_{CM} > \frac{V_{CC}}{2R_L} = \frac{6}{2 \times 8} A = 0.375A$$

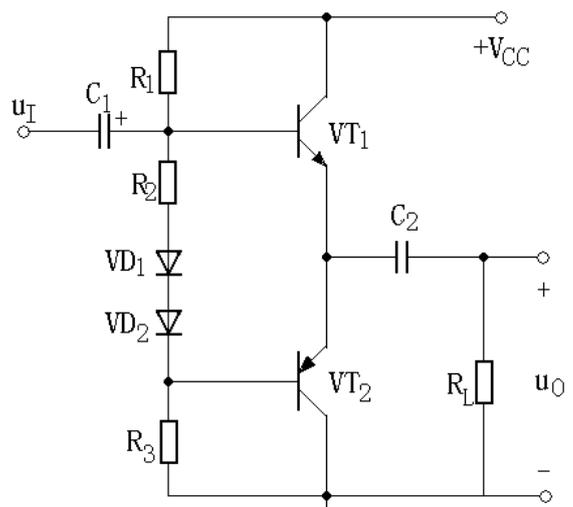


图 P4-3

$$\textcircled{3} \quad U_{(BR)CEO} > V_{CC} = 6V$$

④ 因为互补对称电路中无论哪个三极管导电，电路均工作在射极跟随器状态， $\dot{A}_u \approx 1$ ，而略

小于 1，故 $U_i \approx \frac{U_{cem}}{\sqrt{2}} \approx \frac{V_{CC}/2}{\sqrt{2}} = \frac{6/2}{\sqrt{2}} V \approx 2.12V$ 。

本题的意图是了解 OTL 互补对称电路中功率三极管极限参数的估算方法。

◆◆ 习题 4-5 在图 P4-1 和图 P4-3 所示的两个互补对称电路中，已知 $R_L = 8 \Omega$ ，假设三极管的饱和管压降 U_{CES} 均为 $1V$ ，如果要求得到最大输出功率 $P_{om} = 3W$ ，试分别估算两个电路的直流电源 V_{CC} 分别应为多大。

解：

对于图 P4-1 的 OCL 电路

$$P_{om} = \frac{1}{2} U_{cem} I_{cm} = \frac{U_{cem}^2}{2R_L} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

$$\Rightarrow V_{CC} = \sqrt{2R_L P_{om}} + U_{CES} = (\sqrt{2 \times 8 \times 3} + 1)V \approx 7.93V$$

对于图 P4-3 的 OTL 电路

$$P_{om} = \frac{1}{2} U_{cem} I_{cm} = \frac{U_{cem}^2}{2R_L} = \frac{(V_{CC}/2 - U_{CES})^2}{2R_L}$$

$$\Rightarrow V_{CC} = 2(\sqrt{2R_L P_{om}} + U_{CES}) = 2 \times (\sqrt{2 \times 8 \times 3} + 1)V \approx 15.9V$$

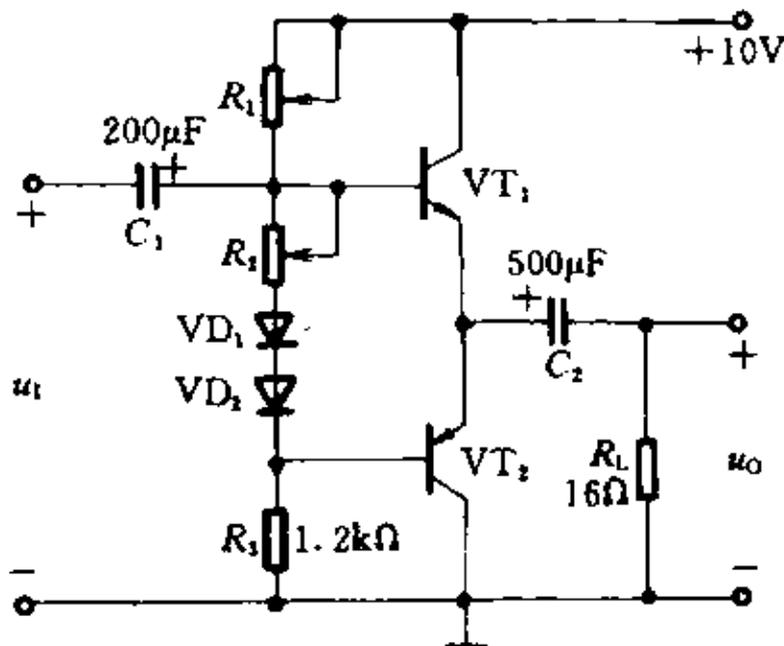
可见，在同样的 P_{om} 和 R_L 时，OTL 电路的 V_{CC} 比 OCL 电路高得多。但前者只需要一个直流电源，而后者需要正、负两路直流电源。

本题的意图是对 OTL 和 OCL 两种电路进行比较，当要求同样的 P_{om} 时所需的 V_{CC} 各为多少。

◆◆ 习题 4-6 分析图 P4-6 中的 OTL 电路原理，试回答：

① 静态时，电容 C_2 两端的电压应该等于多少？调整哪个电阻才能达到上述要求？

② 设 $R_1 = 1.2k\Omega$ ，三极管的 $\beta = 50$ ， $P_{CM} = 200mW$ ，若电阻 R_2 或某一个二极管开路，三极管是否安全？



解:

- ① 静态时, 电容 C_2 两端的电压应等于 $V_{CC}/2$, 即 5V。应调整电阻 R_1 达到此要求。
- ② 若电阻 R_2 或某一个二极管开路, 则

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{V_{CC} - 2U_{BE}}{R_1 + R_3} = \frac{10 - 2 \times 0.7}{1.2 + 1.2} \text{mA} \approx 3.58 \text{mA}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \beta I_{B1} = 50 \times 3.58 \text{mA} = 179 \text{mA}$$

$$P_{T1} = P_{T2} = I_{C1} U_{CE1} = (179 \times 5) \text{mW} = 895 \text{mW} > P_{CM}$$

因此, 三极管将被烧毁。

本题的意图是理解 OTL 电路的工作原理, 了解保证电路安全的重要措施。

◆◆ 习题 4-7 分析图 P4-7 中的 OCL 电路原理, 试回答:

- ① 静态时, 负载 R_L 中的电流应为多少?
- ② 若输出电压波形出现交越失真, 应调整哪个电阻? 如何调整?
- ③ 若二极管 VD_1 或 VD_2 的极性接反, 将产生什么后果?
- ④ 若 VD_1 、 VD_2 、 R_2 三个元件中任一个发生开路, 将产生什么后果?

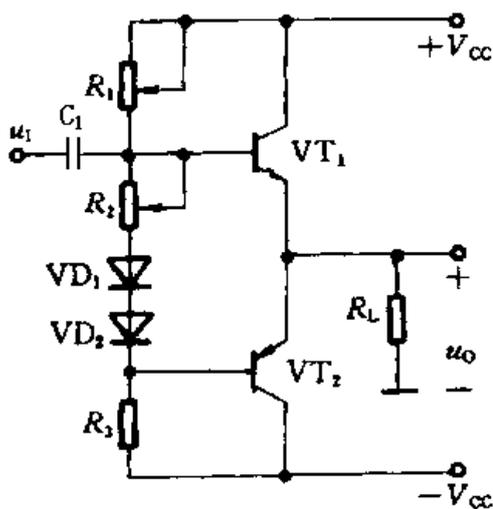


图 P4-7

解:

- ① 静态时, 负载 R_L 中的电流应为 0, 如不符合要求, 应调整电阻 R_1 ;
- ② 若输出电压波形出现交越失真, 应调整电阻 R_2 , 增大的 R_2 阻值;
- ③ 若二极管 VD_1 或 VD_2 的极性接反, 将使功率三极管电流急剧增大, 可能烧毁三极管;

④ 若 VD_1 、 VD_2 、 R_2 三个元件中任一开路，同样可能使功率三极管电流急剧增大，烧毁三极管。

本题的意图是理解 OCL 电路的工作原理，了解交越失真的概念以及减小交越失真和保证电路安全的措施。

◆◆ 习题 4-8 试分析图 P4-8 中各复合管的接法是否正确。如果认为不正确，请扼要说明原因；如果接法正确，说明所组成的复合管的类型（NPN 或 PNP），指出相应的电极，并列出的复合管的 β 和 r_{be} 的表达式。

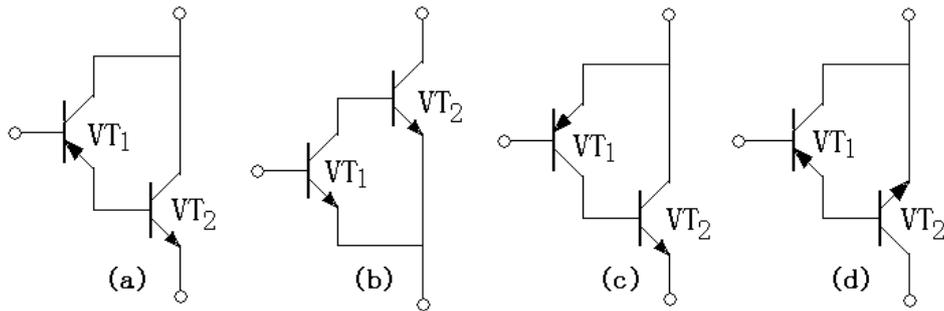


图 P4-8

解：

(a) 接法不正确。因 i_{C1} 和 i_{B2} 的实际方向正好相反，无法形成统一的电流通路。从输入端看，在 $b1$ 和 $e2$ 之间无论加上何种极性的电压， VT_1 和 VT_2 两者之中总有一个管子的发射结将被反向偏置。

(b) 接法不正确。因 i_{C1} 和 i_{B2} 的实际方向正好相反，无法形成统一的电流通路。

(c) 接法正确。复合管为 PNP 型。 $b1$ 是复合管的 b ， $e1(c2)$ 是复合管的 e ， $e2$ 是复合管 c ，复合管的 r_{be} 和 β 分别为 $r_{be} = r_{be1}$ ， $\beta = \beta_1(1 + \beta_2) \approx \beta_1\beta_2$

(d) 接法不正确。因 i_{E1} 和 i_{B2} 的实际方向正好相反，无法形成统一的电流通路。

本题的意图是了解复合管的正确接法和类型，以及复合管的 β 和 r_{be} 。

◆◆ 习题 4-9 在图 P4-9 所示由复合管组成的互补对称放大电路中，已知电源电压 $V_{CC} = 16V$ ，负载电阻 $R_L = 8\Omega$ ，设功率三极管 VT_3 、 VT_4 的饱和管压降 $U_{CES} = 2V$ ，电阻 R_{e3} 、 R_{e4} 上的压降可以忽略，

① 试估算电路的最大输出功率 P_{om} ；

② 估算功率三极管 VT_3 、 VT_4 的极限参数 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} ；

③ 假设复合管的总 $\beta = 600$ ，则要求前置放大级提供给复合管基极的电流最大值 I_{Bm} 等于多少？

④ 若本电路不采用复合管，而用 $\beta = 20$ 的功率三极管，此时要求前置放大级提供给三极管基极的电流最大值 I_{Bm} 等于多少？

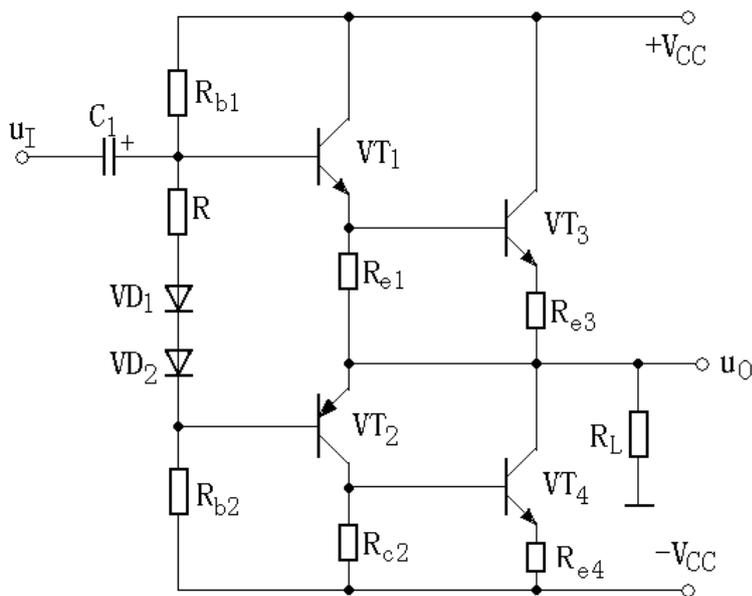


图 P4-9

解:

$$\textcircled{1} P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = \frac{(16 - 2)^2}{2 \times 8} W = 12.25W \quad \text{如忽略 } U_{CES}, \text{ 则}$$

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{16^2}{2 \times 8} W = 16W$$

②

$$I_{CM} > \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{16}{8} A = 2A, U_{(BR)CEO} > 2V_{CC} = (2 \times 16)V = 32V, P_{CM} > 0.2P_{om} = (0.2 \times 16)W = 3.2W$$

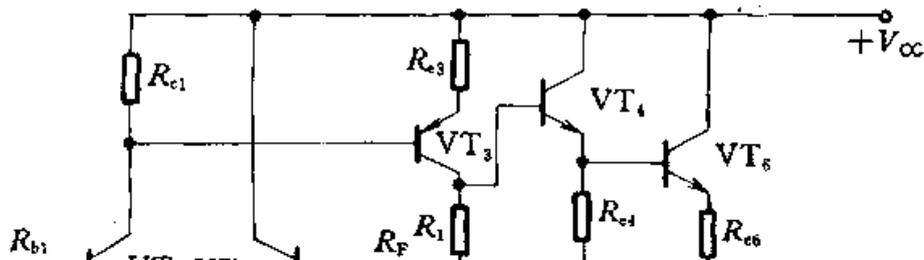
$$\textcircled{3} I_{Bm} = \frac{I_{Cm}}{\beta} = \frac{2}{600} A \approx 3.33mA$$

$$\textcircled{4} I_{Bm} = \frac{I_{Cm}}{\beta} = \frac{2}{20} A \approx 100mA$$

本题的意图是了解由复合管组成的互补对称电路的特点。

◆◆ 习题 4-10 分析图 P4-10 所示的功率放大电路, 要求:

- ① 说明放大电路中共有几个放大级, 各放大级包括哪几个三极管, 分别组成何种类型的电路。
- ② 分别说明以下元件的作用: R_1 、 VD_1 和 VD_2 ; R_3 和 C ; R_F 。
- ③ 已知 $V_{CC}=15V$, $R_L=8\Omega$, VT_6 、 VT_7 的饱和管压降 $U_{CES}=1.2V$, 当输出电流达到最大时, 电阻 R_{e6} 和 R_{e7} 上的电压降均为 $0.6V$, 试估算电路的最大输出功率。



解:

① 共有三个放大级。输入级包括三极管 VT_1 和 VT_2 ，组成单端输入单端输出差分放大电路。中间级包括 PNP 管 VT_3 ，组成单管共射放大电路。输出级包括 VT_4 、 VT_5 、 VT_6 和 VT_7 ，其中 VT_4 和 VT_6 组成 NPN 型复合管， VT_5 和 VT_7 组成 PNP 型复合管，这两个复合管组成准互补对称电路。

②

R_1 、 VD_1 和 VD_2 的作用是在输出级的两个三极管 VT_4 和 VT_5 基极之间产生一个偏压，使静态时输出级的功放管中已有一个较小的集电极电流，即互补对称输出级工作在甲乙类状态，目的是减小输出波形的交越失真。

R_3 和 C 起补偿作用。因为扬声器为感性负载，接入 R_3 和 C 后，通过补偿，希望总的负载接近纯阻性。

R_F 为反馈电阻，其作用是在电路中引入一个电压串联负反馈，以达到稳定输出电压，提高带负载能力，减小非线性失真等目的。

$$\textcircled{3} P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES} - U_{R_{c6}})^2}{2R_L} = \frac{(15 - 1.2 - 0.6)^2}{2 \times 8} W = 10.89W$$

本题的意图是学习分析一个典型的多级功率放大电路，了解电路的一般组成和一些元件的作用，并估算电路的 P_{om} 。

第五章 习题与思考题

◆◆ 习题 5-1 图 P5-1 是集成运放 BG303 偏置电路的示意图，已知 $V_{CC}=V_{EE}=15V$ ，偏置电阻 $R=1M\Omega$ (需外接)。设各三极管的 β 均足够大，试估算基准电流 I_{REF} 以及输入级放大管的电流 I_{C1} 、 I_{C2} 。

解： VT_4 、 VT_3 、 R 组成镜像电流源，流过 R 的基准电流 I_{REF} 为：

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE}}{R} = \frac{15 + 15 - 0.7}{1} \mu A = 29.3 \mu A$$

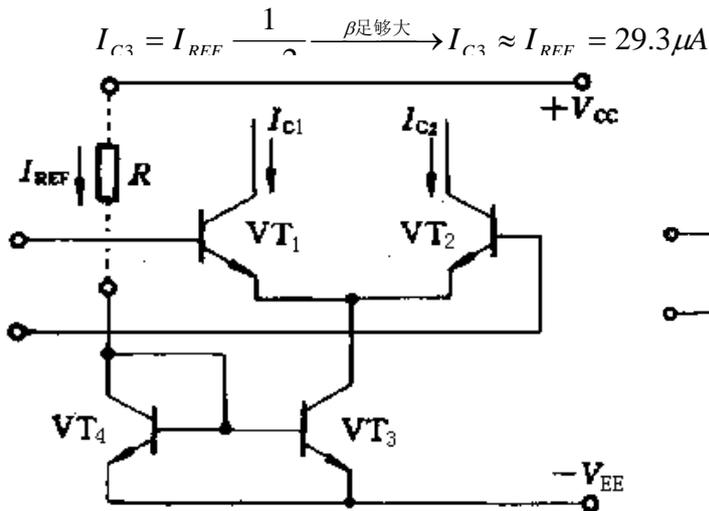


图 P5-1

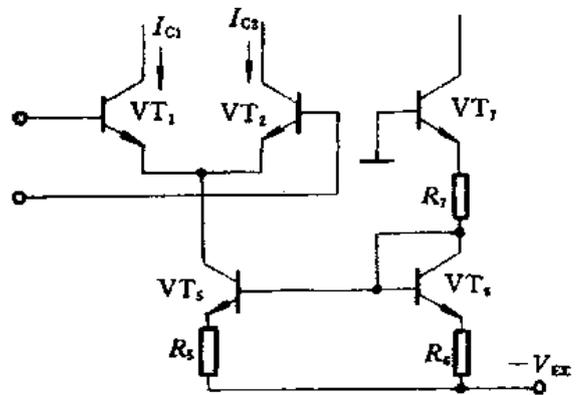


图 P5-2

◆◆ 习题 5-2 图 P5-2 是集成比较器 BG307 偏置电路的示意图。已知 $V_{EE}=6V$ ， $R_5=85\Omega$ ， $R_6=68\Omega$ ， $R_7=1.7k\Omega$ 。设三极管的 β 足够大，试问 V_{T1} 、 V_{T2} 的静态电流 I_{C1} 、 I_{C2} 为多大？

解：

V_{T5} 、 V_{T6} 为核心组成比例电流源，其基准电流 I_{R7} 为：

$$I_{R7} = \frac{0 - 2U_{BE} - (-V_{EE})}{R_6 + R_7} = \frac{0 - 2 \times 0.7 + 6}{68 + 1700} A \approx 2.6mA$$

$$I_{C5} = \frac{R_6}{R_5} I_{C6} \approx \frac{R_6}{R_5} I_{R7} = \left(\frac{68}{85} \times 2.6\right) mA = 2.08mA$$

$$V_{T1}、V_{T2} \text{ 为差分对管，则有： } I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C5} = \frac{1}{2} \times 2.08mA = 1.04mA$$

本题的意图是理解比例电流源的工作原理和估算方法。

◆◆ 习题 5-3 图 P5-3 是集成运放 BG305 偏置电路的示意图。假设 $V_{CC}=V_{EE}=15V$ ，外接电阻 $R=100k\Omega$ ，其他的阻值为 $R_1=R_2=R_3=1k\Omega$ ， $R_4=2k\Omega$ 。设三极管 β 足够大，试估算基准电流 I_{REF} 以及各路偏置电流 I_{C13} 、 I_{C15} 和 I_{C16} 。

解：

此电路为多路比例电流源，其基准电流 I_{REF} 为：

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE}}{R + R_2} = \frac{15 + 15 - 0.7}{100 + 1} mA \approx 0.29mA = 290\mu A$$

各路电流源电流值为：

$$I_{C13} = I_{C15} = \frac{R_1}{R_2} I_{C14} = I_{C14} \approx I_{REF} = 290 \mu A$$

$$I_{C16} = \frac{R_2}{R_4} I_{C14} \approx \frac{R_2}{R_4} I_{REF} = \frac{1}{2} \times 290 \mu A = 145 \mu A$$

本题的意图是练习多路比例电流源的估算方法。

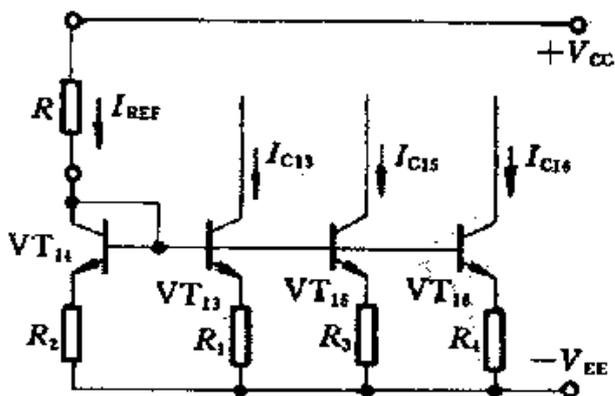


图 P5-3

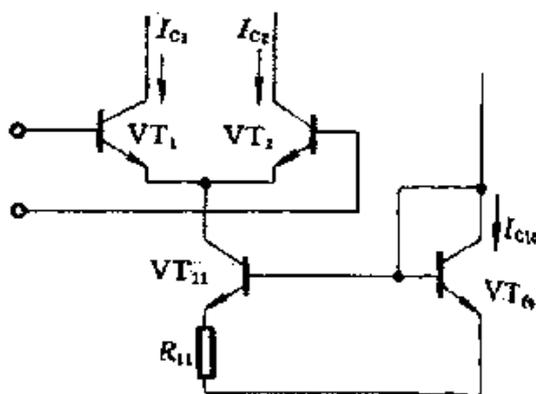


图 P5-4

◆◆ 习题 5-4 图 P5-4 是集成运放 FC3 原理电路的一部分。已知 $I_{C10} = 1.16 \text{ mA}$ ，若要求 $I_{C1} = I_{C2} = 18.5 \mu \text{ A}$ ，试估算电阻 R_{11} 应为多大。设三极管的 β 足够大。

解：

若要求 $I_{C1} = I_{C2} = 18.5 \mu \text{ A}$ ，则 $I_{C11} = 18.5 \mu \text{ A} \times 2 = 37 \mu \text{ A}$ ，有公式： $U_T \ln \frac{I_{C10}}{I_{C11}} \approx I_{C11} R_{11}$ ，则

$$R_{11} \approx \frac{U_T}{I_{C11}} \ln \frac{I_{C10}}{I_{C11}} = \left(\frac{26 \times 10^{-3}}{37 \times 10^{-6}} \times \ln \frac{1.16 \times 10^{-3}}{37 \times 10^{-6}} \right) \Omega = 2.42 \times 10^3 \Omega = 2.42 \text{ k}\Omega$$

本题的意图是理解微电流源的工作原理和估算方法。

◆◆ 习题 5-5 图 5-5 中的电路是一种传输精度更高的镜像电流源，称为威尔逊电流源。

设 $I_{C1} = I_{C2} = I_C$ ， $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ ，试证明： $I_{C3} = I_{REF} \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right)$

$$\text{解： } I_{C3} = I_{E3} \frac{\beta}{1 + \beta} \xrightarrow{I_{E3} = I_{C2} + I_{B1} + I_{B2} = I_C \left(1 + \frac{2}{\beta} \right)} I_{C3} = I_C \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \frac{\beta}{1 + \beta} = I_C \frac{2 + \beta}{1 + \beta}$$

$$I_{C1} = I_{REF} - I_{B3} = I_{REF} - \frac{I_{C3}}{\beta} = I_C$$

$$\Rightarrow I_{C3} = \left(I_{REF} - \frac{I_{C3}}{\beta} \right) \frac{2 + \beta}{1 + \beta} \Rightarrow I_{C3} = I_{REF} \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right)$$

本题的意图是说明威尔逊电流源比一般的镜像电流源 (教材P182页图5.3.2 $I_{C2} = I_{REF} \frac{1}{1 + 2/\beta}$) 具有更高的传输精度。

若 $\beta = 50$, 可算得 I_{C3} 与 I_{REF} 的误差小于 1% , 而一般的镜像电流源 I_{C2} 与 I_{REF} 的误差约为 4% , 可见威尔逊电流源的传输精度更高。

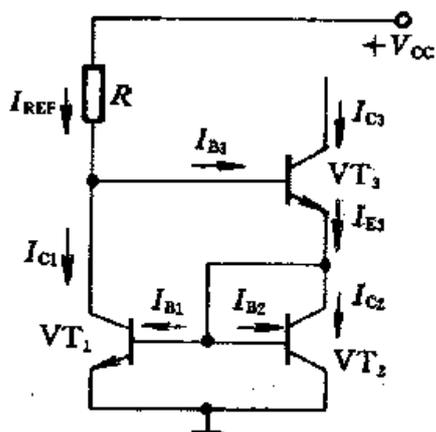


图 P5-5

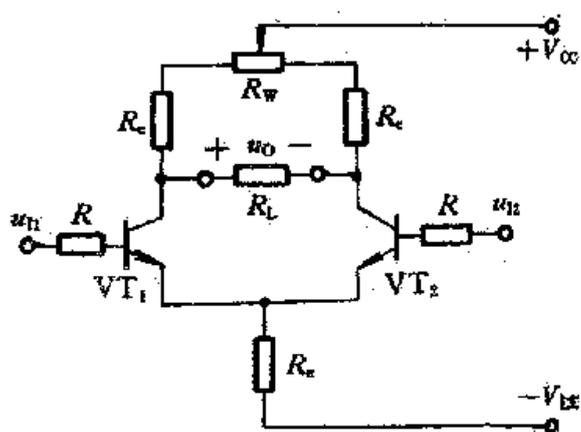


图 P5-6

◆◆ 习题 5-6 在图 P56 中, 假设三极管的 $\beta = 40, r_{be} = 8.2k\Omega$, $V_{CC} = V_{EE} = 15V$, $R_C = 75k\Omega$, $R_e = 56k\Omega$, $R = 1.8k\Omega$, $R_W = 1k\Omega$, R_W 的滑动端处于中点, 负载电阻 $R_L = 30k\Omega$ 。

- ① 求静态工作点;
- ② 求差模电压放大倍数;
- ③ 求差模输入电阻。

解:

①

$$0 - I_{BQ}R - U_{BEQ} - 2I_{EQ}R_e = -V_{EE} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R + 2(1 + \beta)R_e} = \frac{15 - 0.7}{1.8 + 2 \times (1 + 40) \times 56} \text{mA} \approx 3.1\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 40 \times 3.1\mu\text{A} = 124\mu\text{A} \approx 0.12\text{mA}$$

$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ} \left(\frac{R_W}{2} + R_C \right) = [15 - 0.12 \times \left(\frac{1}{2} + 75 \right)] \text{V} = 5.94\text{V} \quad (\text{对地})$$

$$U_{BQ} = 0 - I_{BQ}R = (-3.1 \times 10^{-6} \times 1.8 \times 10^3) \text{V} = -5.58\text{V} \quad (\text{对地})$$

$$\textcircled{2} A_d = -\beta \frac{(R_C + R_W/2) // R_L/2}{R + r_{be}} = -40 \times \frac{(75 + 1/2) // 30/2}{1.8 + 8.2} \approx -50$$

$$\textcircled{3} R_{id} = 2(R + r_{be}) = [2 \times (1.8 + 8.2)] \text{k}\Omega = 20\text{k}\Omega$$

本题的意图是掌握长尾式差分放大电路的静态和动态分析方法。

◆◆ 习题 5-7 在图 P5-7 中, 已知三极管的 $\beta = 100, r_{be} = 10.3k\Omega$, $V_{CC} = V_{EE} = 15V$, $R_c = 36k\Omega$, $R_e = 27k\Omega$, $R = 2.7k\Omega$, $R_w = 100\Omega$, R_w 的滑动端处于中点, 负载电阻 $R_L = 18k\Omega$, 试估算:

- ① 静态工作点;
- ② 差模电压放大倍数;
- ③ 差模输入电阻。

解:

①

$$0 - I_{BQ}R - U_{BEQ} - I_{EQ}\left(\frac{R_w}{2} + 2R_e\right) = -V_{EE}$$

$$\Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R + (1 + \beta)\left(\frac{R_w}{2} + 2R_e\right)} = \frac{15 - 0.7}{2.7 \times 10^3 + (1 + 100) \times \left(\frac{100}{2} + 2 \times 27 \times 10^3\right)} A \approx 2.6 \mu A$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = 100 \times 2.6 \mu A = 260 \mu A \approx 0.26 mA$$

$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c = [15 - 0.26 \times 36]V = 5.64V \quad (\text{对地})$$

$$U_{BQ} = 0 - I_{BQ}R = (-2.6 \times 10^{-6} \times 2.7 \times 10^3)V \approx -7mV \quad (\text{对地})$$

$$\textcircled{2} A_d = -\beta \frac{R_c // \frac{R_L}{2}}{R + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_w}{2}} = -100 \times \frac{36 // 18 / 2}{2.7 + 10.3 + (1 + 100) \times \frac{100 \times 10^{-3}}{2}} \approx -40$$

$$\textcircled{3} R_{id} = 2\left[R + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_w}{2}\right] = 2 \times (2.7 + 10.3 + 101 \times 0.05)k\Omega = 36k\Omega$$

本题的意图是掌握长尾式差分放大电路的静态和动态分析方法。

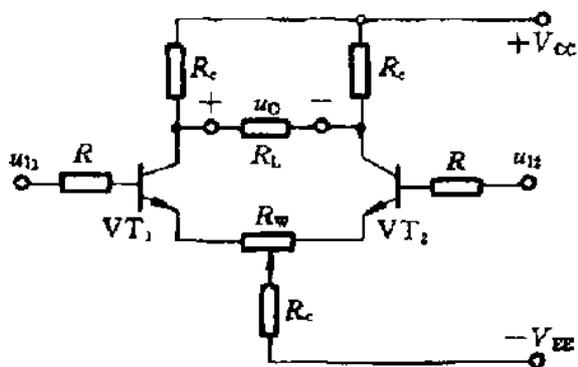


图 P5-7

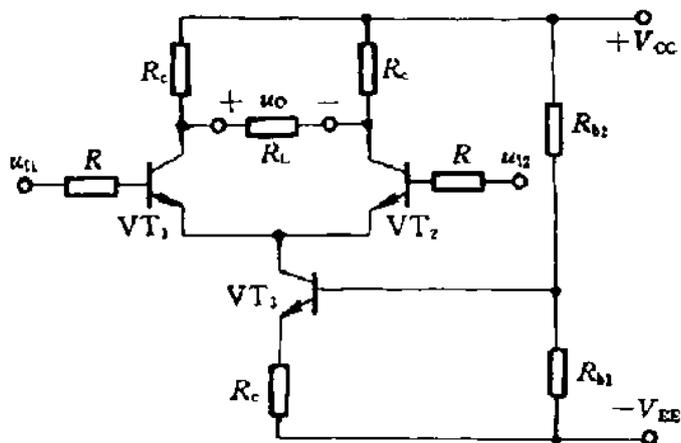


图 P5-9

◆◆ 习题 5-8 为了实现差分放大电路的调零, 通常采用在集电极回路加电位器(见图 P5-6)或在发射

极回路加电位器(见图 P5-7)的办法, 试比较二者的优缺点。

解: 集电极回路加电位器调零比较简单, 但静态调零后, 动态仍有可能不平衡; 电位器的阻值较大, 通常为几千欧至几十千欧。发射极加电位器调零由于引入负反馈, 因此对静态和动态均有调零作用; 所用电位器阻值较小, 一般为几十欧至几百欧; 但引入负反馈后使电压放大倍数有所下降。

本题的意图是通过比较, 了解差分放大电路两种常用的调零方法的优缺点。

◆◆ **习题 5-9** 在图 P5-9 所示的放大电路中, 已知 $V_{CC}=V_{EE}=9V$, $R_c=47k\Omega$, $R_e=13k\Omega$, $R_{b1}=3.6k\Omega$, $R_{b2}=16k\Omega$, $R=10k\Omega$, 负载电阻 $R_L=20k\Omega$, 三极管的 $\beta=30$, $U_{BEQ}=0.7V$ 。

- ① 试估算静态工作点;
- ② 估算差模电压放大倍数。

解:

$$\textcircled{1} \quad U_{R_{b1}} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} (V_{CC} + V_{EE}) = \frac{3.6}{3.6 + 16} \times (9 + 9)V \approx 3.31V$$

$$I_{CQ3} \approx I_{EQ3} = \frac{U_{R_{b1}} - U_{BEQ3}}{R_e} = \frac{3.31 - 0.7}{13} mA \approx 0.2mA$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx 0.5I_{CQ3} \approx 0.5 \times 0.2mA = 0.1mA$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ1}R_c = (9 - 0.1 \times 47)V = 4.3V$$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} \approx \frac{I_{CQ1}}{\beta} = \frac{0.1}{30} mA \approx 3.3\mu A$$

$$\textcircled{2} \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} = r_{bb'} + \frac{26mV}{I_{BQ}} = (300 + \frac{26}{3.3 \times 10^{-3}}) \Omega = 8179\Omega \approx 8.2k\Omega$$

$$A_d = -\beta \frac{R_c // R_L / 2}{R + r_{be}} = -30 \times \frac{47 // 20 / 2}{10 + 8.2} \approx -13.6$$

本题的意图是掌握恒流源式差分放大电路的静态和动态分析方法。

◆◆ **习题 5-10** 已知图 P5-10 中三极管的 $\beta=80$, $U_{BEQ}=0.6V$, $V_{CC}=V_{EE}=15V$, $R_c=20k\Omega$, $R_{e3}=7.5k\Omega$, $R_{e4}=750\Omega$, $R_{c4}=27k\Omega$ 。

- ① 试估算放大管的 I_{CQ} 和 U_{CQ} (对地);
- ② 估算 A_d 、 R_{id} 和 R_o 。
- ③ 若要求静态时放大管的 $U_{CQ}=12V$ (对地), 则偏置电路的电阻 R 应为多大?

解:

- ① VT_3 、 VT_4 为核心组成比例电流源, 其基准电流为:

$$I_{R_{c4}} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE}}{R_{c4} + R_{e4}} = \frac{15 + 15 - 0.6}{27 + 0.75} mA \approx 1.06mA$$

$$I_{CQ3} = \frac{R_{e4}}{R_{e3}} I_{CQ4} \approx I_{Rc4} \frac{R_{e4}}{R_{e3}} = (1.06 \times \frac{0.75}{7.5}) mA = 0.106 mA = 106 \mu A$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{1}{2} I_{CQ3} = 0.5 \times 0.106 mA = 53 \mu A$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ1} R_{C1} = 15 - 53 \times 10^{-3} \times 20 = 13.94 V$$

$$\textcircled{2} \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 mV}{I_{EQ1}} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 mV}{I_{CQ1}} = [300 + (1 + 80) \frac{26}{53 \times 10^{-3}}] \Omega \approx 40 k\Omega$$

$$A_d = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -80 \times \frac{20}{40} = -40$$

$$R_{id} = 2r_{be} = (2 \times 40) k\Omega = 80 k\Omega$$

$$R_o = 2R_C = (2 \times 20) k\Omega = 40 k\Omega$$

$$\textcircled{3} \quad U_{CQ1} = V_{CC} - I_{CQ1} R_{C1} \Rightarrow I_{CQ1} = \frac{V_{CC} - U_{CQ1}}{R_{C1}} = \frac{15 - 12}{20} mA = 0.15 mA = 150 \mu A$$

$$I_{CQ3} = 2I_{CQ1} = (2 \times 150) \mu A = 300 \mu A = 0.3 mA$$

$$I_{CQ3} = \frac{R_{e4}}{R_{e3}} I_{CQ4} \approx I_{Rc4} \frac{R_{e4}}{R_{e3}} \Rightarrow I_{Rc4} \approx \frac{R_{e3}}{R_{e4}} I_{CQ3} = (\frac{7.5}{0.75} \times 0.3) mA = 3 mA$$

$$I_{Rc4} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE}}{R_{c4} + R_{e4}} \Rightarrow R_{c4} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE}}{I_{Rc4}} - R_{e4} = (\frac{15 + 15 - 0.6}{3} - 0.75) k\Omega = 9.05 k\Omega$$

本题是用比例电流源提供恒流的差分放大电路，本题的意图是对比例电流源和恒流源差分放大电路这两种电路的分析方法进行综合训练。

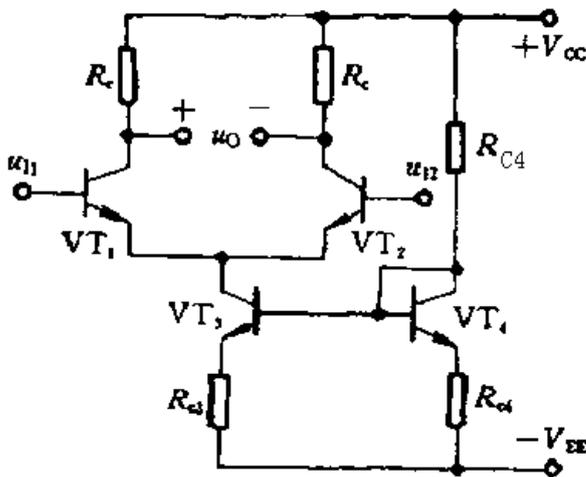


图 P5-10

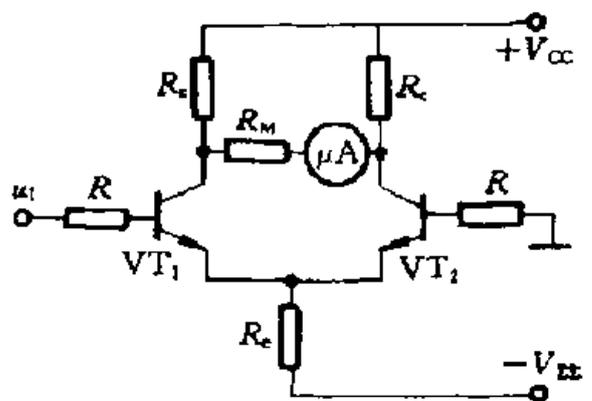


图 P5-11

◆◆ 习题 5-11 在图 P5-11 所示的电路中, 设电流表的满偏转电流为 $100\mu\text{A}$, 电表支路的总电阻 $R_M=2\text{k}\Omega$, 两管的 $\beta=50, V_{CC}=V_{EE}=6\text{V}, R_c=5.1\text{k}\Omega, R_e=5.1\text{k}\Omega, R=10\text{k}\Omega$ 。试计算:

- ① 当 $U_i=0$ 时, 每管的 I_{BQ} 和 I_{CQ} 各是多少?
- ② 接入电流表后, 要使它的指针满偏, 需要加多大的输入电压?
- ③ 不接电流表时的开路电压放大倍数是多少(输出取自两管集电极);
- ④ 如果 $|u_i|$ 增加到 2V , 这时会出现什么情况? 你估计流过电流表的电流大概有多少?
- ⑤ 为了改善抑制零漂的性能, 有人建议将 R_o 增大到 $100\text{k}\Omega$, 你认为是否合适?

解:

①

$$I_{BQ}R + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R + 2(1 + \beta)R_e} = \frac{6 - 0.6}{10 + 2 \times (1 + 50) \times 5.1} \mu\text{A} \approx 10\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = (50 \times 10)\mu\text{A} = 500\mu\text{A} = 0.5\text{mA}$$

$$\textcircled{2} r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ1}} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{CQ1}} = [300 + (1 + 50) \frac{26}{0.5}] \Omega = 2.952\text{k}\Omega$$

$$A_d = -\beta \frac{R_c // \frac{R_M}{2}}{R + r_{be}} = -50 \times \frac{5.1 // \frac{2}{2}}{10 + 2.95} \approx -3.23$$

$$u_o = 100\mu\text{A} \times 2\text{k}\Omega = 200\text{mV}$$

$$|u_i| = \left| \frac{u_o}{A_d} \right| = \left| \frac{200\text{mV}}{-3.23} \right| \approx 62\text{mV}$$

$$\textcircled{3} A_d = -\beta \frac{R_c}{R + r_{be}} = -50 \times \frac{5.1}{10 + 2.95} \approx -19.7$$

$$\textcircled{4} I_{R_e} = 2I_{EQ} \approx 2I_{CQ} = 2 \times 0.5\text{mA} = 1\text{mA}$$

$$V_E = I_{R_e}R_e - V_{EE} = 1\text{mA} \times 5.1\text{k}\Omega - 6\text{V} = -0.9\text{V}$$

当 $|u_i|=2\text{V}$ 时, 设 $u_i=-2\text{V}$, 则 VT_1 截止, VT_2 导电。此时,

$$I_{BQ2} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ2}}{R + (1 + \beta)R_e} = \frac{6 - 0.6}{10 + (1 + 50) \times 5.1} \mu\text{A} \approx 20\mu\text{A}$$

$$I_{CQ2} \approx \beta I_{BQ2} = (50 \times 20)\mu\text{A} = 1500\mu\text{A} = 1\text{mA}$$

$$i_M = \frac{R_{C2}}{R_{C1} + R_{C2} + R_M} I_{CQ2} = \left(\frac{5.1}{5.1 + 5.1 + 2} \times 1 \right) \text{mA} \approx 0.418\text{mA}$$

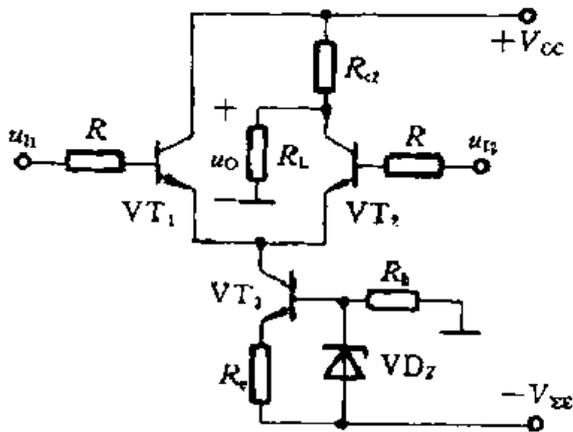


图 P5-13

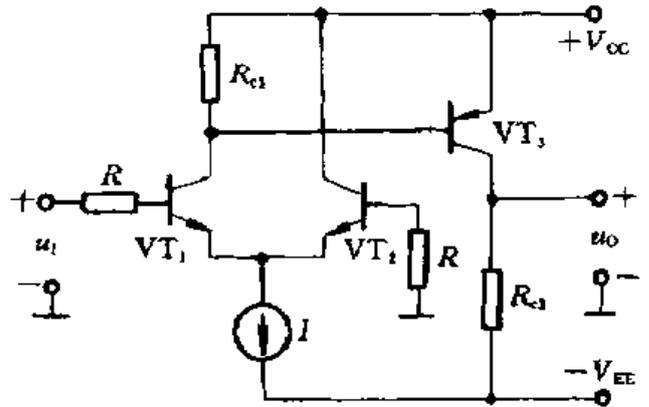


图 P5-14

◆◆ 习题 5-14 在图 P5-14 所示的放大电路中, $V_{CC}=V_{EE}=15V$, $R_{C1}=10k\Omega$, $R_1=R_2=1k\Omega$, 恒流源电流 $I=0.2mA$, 假设各三极管的 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7V$, $r_{be1}=r_{be2}=13.5k\Omega$, $r_{be3}=1.2k\Omega$ 。

- ① 试分析差分输入级属于何种输入、输出接法。
- ② 若要求当输入电压等于零时, 输出电压也等于零, 则第二级的集电极负载电阻 R_{C3} 应有多大?
- ③ 分别估算第一级和第二级的电压放大倍数 A_{u1} 和 A_{u2} , 以及总的电压放大倍数 A_u 。

解:

- ① 差分输入级属于单端输入、单端输出接法。

$$\textcircled{2} I_{CQ1} = 0.5I = 0.5 \times 0.2mA = 0.1mA$$

$$I_{R_{C1}} = \frac{U_{EBQ3}}{R_{C1}} = \frac{0.7}{10} mA = 0.07mA$$

$$I_{BQ3} = I_{CQ1} - I_{R_{C1}} = (0.1 - 0.07) mA = 0.03mA$$

$$I_{CQ3} = \beta I_{BQ3} = 50 \times 0.03mA = 1.5mA$$

欲使 $U_i=0$ 时 $U_o=0$, 则 R_{C3} 上的压降应等于 V_{EE} , 即

$$R_{C3} = \frac{V_{EE}}{I_{CQ3}} = \frac{15}{1.5} k\Omega = 10k\Omega$$

$$\textcircled{3} A_{u1} = -\frac{1}{2} \beta \frac{R_{C1} // r_{be3}}{R + r_{be1}} = -\frac{1}{2} \times 50 \times \frac{10 // 1.2}{1 + 13.5} \approx -1.85$$

$$A_{u2} = -\beta \frac{R_{C3}}{r_{be3}} = -\frac{50 \times 10}{1.2} \approx -417$$

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} = (-1.85) \times (-417) \approx 771.5$$

本题的意图是对前置级由差分放大电路组成的两级直接耦合放大电路进行综合练习。

◆◆ 习题 5-15 图 P5-15 是某集成运放中间级的示意图。假设 $\beta_1=100, \beta_2=150, I_{C3}=0.365\text{mA}$, 三极管 $VT_2、VT_3$ 的集电极等效内阻为 $r_{ce2}=r_{ce3}=274\text{k}\Omega$, 负载电阻 $R_L=300\text{k}\Omega$ 。

- ① 分析电路中的各个三极管分别起什么作用;
- ② 估算三极管 $VT_1、VT_2$ 的等效输入电阻 $r_{be1}、r_{be2}$;
- ③ 估算复合管等效的 β 和 r_{be} ;
- ④ 估算放大电路的电压放大倍数 A_u 。

提示: 本题中负载电阻 R_L 的阻值与有源负载的等效电阻 r_{ce3} 均很大, 与放大管集电极等效电阻 r_{ce2} 属于同一数量级, 因此都不能忽略。此时,

$$A_u = -\frac{\beta(r_{ce2} // r_{ce3} // R_L)}{r_{be}}$$

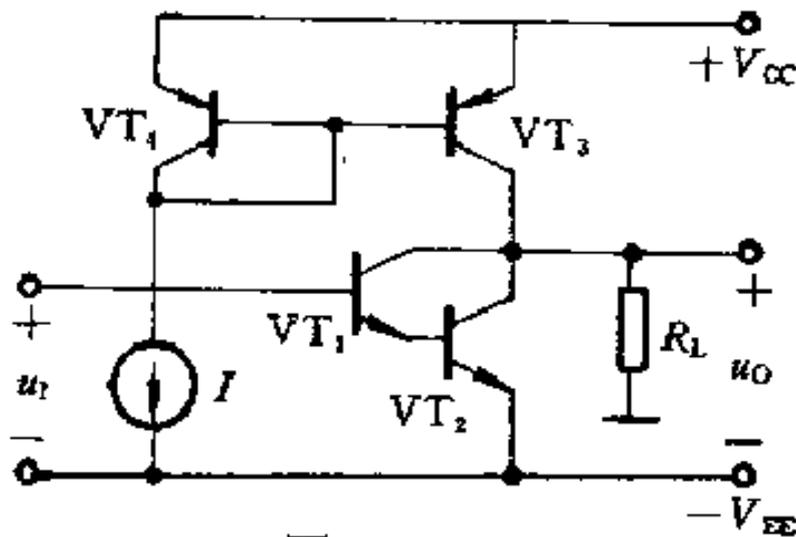


图 P5-15

解:

① VT_1 和 VT_2 组成的复合管充当放大管, VT_3 为有源负载, VT_3 和 VT_4 组成镜像电流源, 作为偏置电路。

$$② \quad r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta_2) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ2}} = [300 + (1 + 150) \frac{26}{0.365}] \approx 11.1\text{k}\Omega$$

$$I_{EQ1} = I_{BQ2} \approx \frac{I_{EQ2}}{\beta_2} \approx \frac{0.365}{150} \approx 0.0024\text{mA}$$

$$r_{be1} = r_{bb'} + (1 + \beta_1) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ1}} = [300 + (1 + 100) \frac{26}{0.0024}] \approx 1094.5\text{k}\Omega$$

$$③ \quad \beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2 = 150 \times 100 = 15000$$

$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2} = [1094.5 + (1 + 100) \times 11.1]k\Omega = 2215.6k\Omega$$

$$\textcircled{4} A_u = -\frac{\beta(r_{ce2} // r_{ce3} // R_L)}{r_{be}} = -\frac{15000 \times (274 // 274 // 300)}{2215.6} = -636.7$$

本题是一个用镜像电流源提供偏置电流，以复合管作为放大管的共射放大电路，组成某集成运放的中间级。本题的意图是对复合管以及复合管放大电路的分析方法进行练习。

◆◆ 习题 5-16 图 P5-16 是集成运放 F004 的电路原理图，试问：

- ① 电路中共有几个放大级，各级由哪些管子组成，分别构成何种放大电路？
- ② 在两个三极管 VT1 和 VT2 的基极中，哪个是反相输入端，哪个是同相输入端？

解：

① 共有四个放大级。输入级由 VT₁、VT₂ 和 VT₃ 组成，构成双端输入、双端输出恒流源式差分放大电路。第二级由 VT₄、VT₅ 和 VT₁₀ 组成共集电极组态的差分放大电路，起跟随和隔离作用。横向 PNP 三极管 VT₆ 组成第三级，前一级的差分输出电压加在 VT₆ 的 b、e 之间，放大后的集电极电压输出到下一级 VT₇ 的基极。该级同时完成电平移动和双端—单端的转换。输出级由 VT₇、VT₈ 和 VT₉ 组成射极输出器，VT₇、VT₈ 组成复合管作为功率放大管，VT₉ 是其有源负载。

② VT₁ 基极为反相输入端，VT₂ 基极为同相输入端。

本题的意图是学习分析一个集成运放的电路图，了解集成运放各个组成部分的作用。

第六章 习题与思考题

◆◆ 习题 6-1 在图 P6-1 所示的各放大电路中，试说明存在哪些反馈支路，并判断哪些是负反馈，哪些是正反馈；哪些是直流反馈，哪些是交流反馈。如为交流反馈，试分析反馈的组态。假设各电路中电容的容抗可以忽略。

◆◆ 习题 6-3 在图 P6-1 所示的各电路中，试说明哪些反馈能够稳定输出电压，哪些能够稳定输出电流，哪些能够提高输入电阻，哪些能够降低输出电阻。

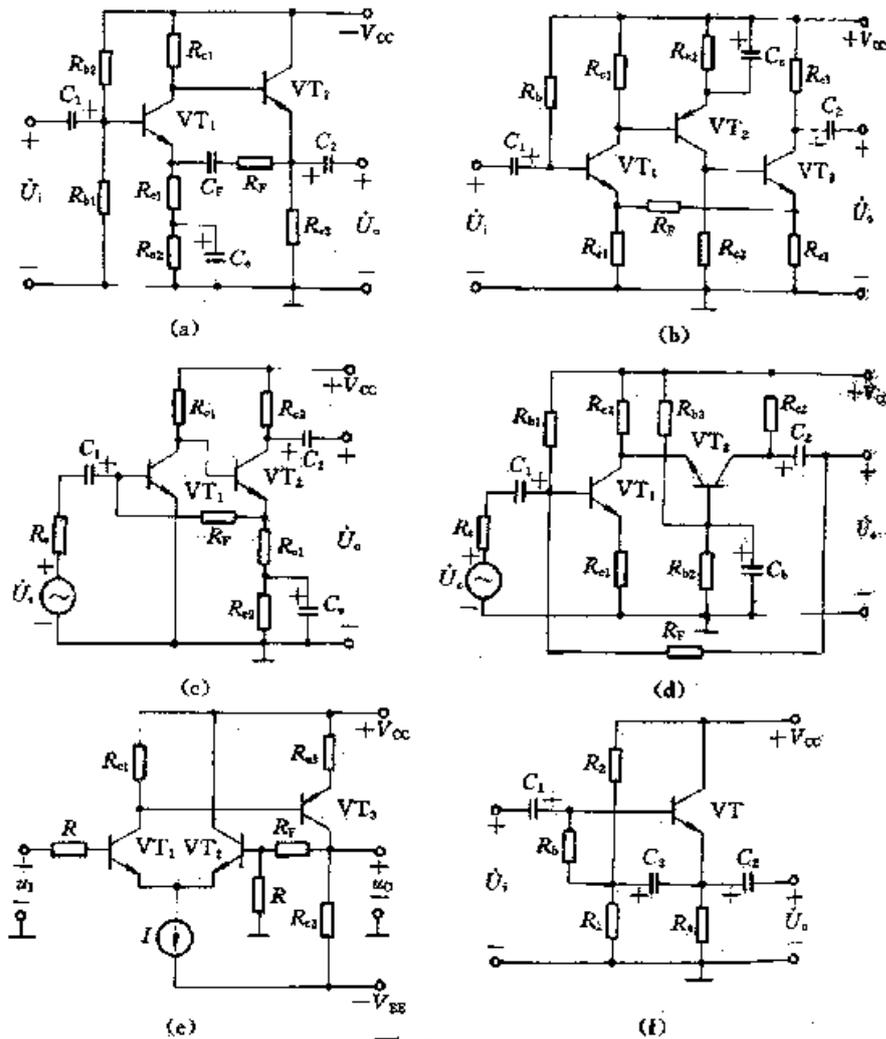


图 P6-1

解:

(a) ① R_{c1} 引入第一级的交直流负反馈, 其中交流电流串联负反馈可稳定本级的工作电流, 提高输入电阻, 直流负反馈可稳定本级的静态工作点; ② R_{e2} 和 C_e 也引入第一级的直流负反馈, 可稳定本级的静态工作点; ③ R_{e3} 引入第二级的交直流负反馈, 交流电压串联负反馈可稳定输出电压, 提高本级的输入电阻, 降低输出电阻, 而直流负反馈可稳定本级的静态工作点; ④ R_f 和 C_f 引入级间(整体)交流电压串联正反馈, 故总体来说不能稳定输出电压或输出电流。

(b) ① R_{c1} 引入第一级的交直流负反馈, 其中交流电流串联负反馈可稳定本级的工作电流, 提高输入电阻, 直流负反馈可稳定本级的静态工作点; ② R_{e2} 和 C_e 引入第二级的直流负反馈, 可稳定本级的静态工作点; ③ R_{c3} 引入第三级的交直流负反馈, 交流电流串联负反馈可稳定输出电流, 提高本级的输入电阻, 提高输出电阻, 而直流负反馈可稳定本级的静态工作点; ④ R_f 引入级间(整体)交直流负反馈, 其中交流电流串联负反馈可稳定输出电流, 提高输出电阻, 提高输入电阻, 而直流负反馈可稳定各级静态工作点。

(c) ① R_{c1} 引入第二级的交直流负反馈, 其中交流电流串联负反馈可稳定本级的工作电流, 提高本级输入电阻, 提高输出电阻, 而直流负反馈可稳定本级的静态工作点; ② R_{e2} 和 C_e 引入第二级的直流负反馈, 可稳定本级的静态工作点; ③ R_f 引入级间(整体)交直流负反馈, 其中交流电流并联负反馈可稳定输出电流, 提高输出电阻, 降低输入电阻, 而直流负反馈可稳定各级静态工作点。

(d) ① R_{c1} 引入第一级的交直流负反馈, 其中交流电流串联负反馈可稳定本级的工作电流, 提高输

入电阻，直流负反馈可稳定本级的静态工作点； ② R_F 引入级间（整体）交直流负反馈，其中交流电压并联负反馈可稳定输出电压，提高输出电阻，降低输入电阻，而直流负反馈可稳定各级静态工作点。

(e) ① R_{e1} 引入第二级的交直流负反馈，其中交流电流串联负反馈可稳定本级的工作电流，提高本级输入电阻，提高输出电阻，而直流负反馈可稳定本级的静态工作点； ② R_F 引入级间（整体）交直流负反馈，其中交流电压串联负反馈可稳定输出电压，提高输出电阻，降低输入电阻，而直流负反馈可稳定各级静态工作点。

(f) 本电路是在射极输出器的基础上，再从 VT 的发射极通过电容 C_3 引导回一个交流电压并联正反馈。射极输出器本身为电压串联负反馈，具有稳定输出电压，提高输入电阻，降低输出电阻的作用。若不接电容 C_3 ，其输入电阻因受基极偏置电阻的影响，其值只能接近于 $R_i = R_b + (R_1 // R_2)$ 。现由 C_3 引回一个电压并联正反馈，由于射极输出器的电压放大倍数接近于 1，即 VT 发射极和基极的交流电位接近相等，则电阻 R_b 两端的交流压降很小，故流过 R_b 的交流电流也很小，因而大大提高了电路的输入电阻。这种将输出电压通过电容引回到输入回路以提高输入电阻的措施为“自举”。

此二题属于基本概念题，意图是判断分立元件放大电路中反馈的类型和作用。

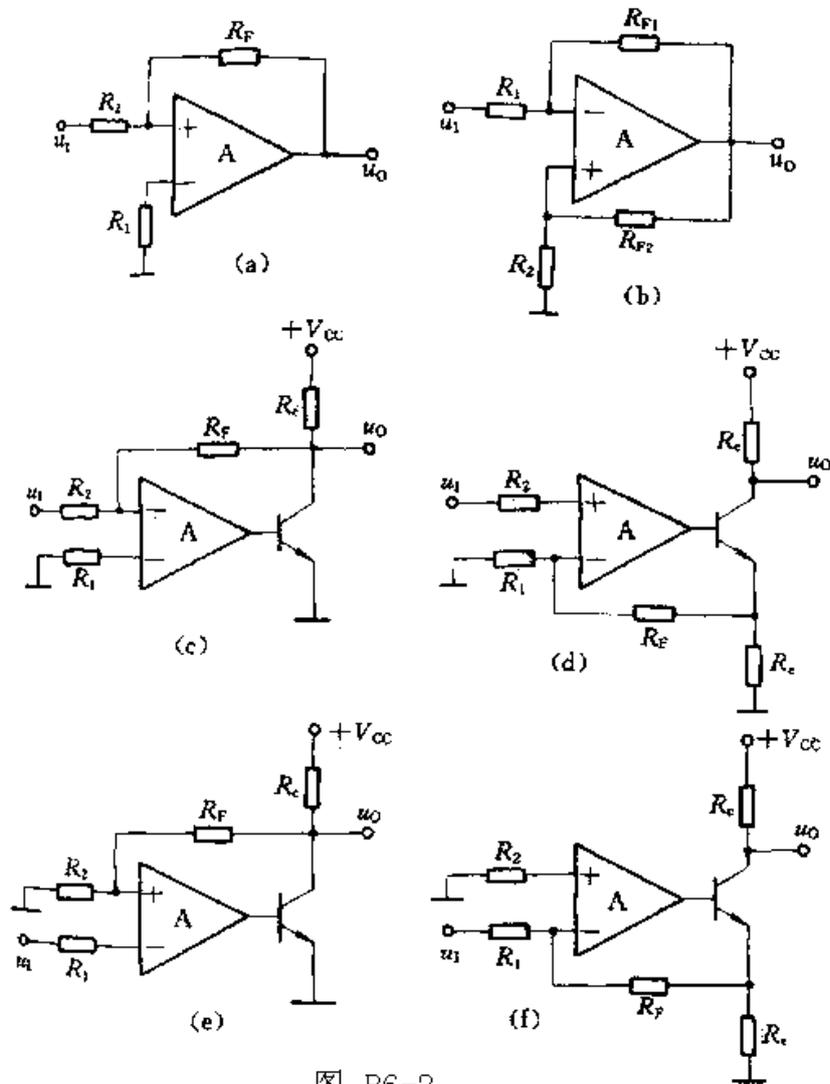


图 P6-2

◆◆ 习题 6-2 试判断图 P6-2 各电路中反馈的极性和组态。

◆◆ 习题 6-3 在图 P6-2 所示的各电路中，试说明哪些反馈能够稳定输出电压，哪些能够稳定输出

电流，哪些能够提高输入电阻，哪些能够降低输出电阻。

解：

(a) R_F 引入电压并联正反馈。

(b) ① R_{F1} 引入电压并联负反馈，稳定输出电压，降低输出电阻，降低输入电阻； ② R_{F2} 引入电压串联正反馈。

(c) R_F 引入电压并联负反馈，稳定输出电压，降低输出电阻，降低输入电阻。

(d) R_F 引入电流串联负反馈，稳定输出电流，提高输出电阻，提高输入电阻。

(e) R_F 引入电压串联负反馈，稳定输出电压，提高输入电阻，降低输出电阻。

(f) R_F 引入电流并联负反馈，稳定输出电流，降低输入电阻，提高输出电阻。

此二题属于基本概念题，意图是判断主要由集成运放组成的放大电路中反馈的类型和作用。

◆◆ 习题 6-4 设图 P6-1(b)~(e)的电路满足深负反馈的条件，试用近似估算法分别估算它们的电压放大倍数。

解：

(b) R_F 引入深度的电流串联负反馈，有 $\dot{U}_f \approx \dot{U}_i$ ，

$$\dot{I}_{e3} = \dot{I}_{c3} \approx \dot{I}_o = -\frac{\dot{U}_o}{R_{c3}} \quad \dot{U}_f = R_{e1} \cdot \frac{R_{e3}}{R_{e1} + R_F + R_{e3}} \cdot \dot{I}_{e3} = -\frac{R_{e1} \cdot R_{e3}}{R_{c3}(R_{e1} + R_F + R_{e3})} \cdot \dot{U}_o$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = -\frac{R_{c3}(R_{e1} + R_F + R_{e3})}{R_{e1} \cdot R_{e3}}$$

(c) R_F 引入深度的电流并联负反馈，有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$ ，

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_s}{R_s} \quad \dot{I}_f = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} \cdot \dot{I}_{e2} \approx \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} \cdot \dot{I}_o = -\frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} \cdot \frac{\dot{U}_o}{R_{c2}}$$

$$\frac{\dot{U}_s}{R_s} \approx -\frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} \cdot \frac{\dot{U}_o}{R_{c2}} \quad \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx -\frac{R_{c2}(R_{e1} + R_F)}{R_{e1} \cdot R_s}$$

(d) R_F 引入深度的电压并联负反馈，有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$ ，

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_s}{R_s} \quad \dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \quad \frac{\dot{U}_s}{R_s} = -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \Rightarrow \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{R_F}{R_s}$$

(e) R_F 引入深度的电压串联负反馈，有 $\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$

$$\dot{F}_{uu} = \frac{R_2}{R_2 + R_F} \Rightarrow \dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$

◆◆ 习题 6-5 设图 P6-2(c)~(f)中的集成运放均为理想运放，各电路均满足深负反馈条件，试分别估算它们的电压放大倍数。

解：

(c) R_F 引入深度的电压并联负反馈, 有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R_2} \quad \dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \quad \frac{\dot{U}_i}{R_2} = -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \Rightarrow \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_F}{R_2}$$

(d) R_F 引入深度的电压串联负反馈, 有 $\dot{A}_{uuf} \approx 1/\dot{F}_{uu}$

$$\dot{F}_{uu} = \frac{R_2}{R_2 + R_F} \quad \dot{A}_{uuf} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}} \approx 1 + \frac{R_F}{R_2}$$

(e) R_F 引入深度的电流并联负反馈, 有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R_1} \quad \dot{I}_f = -\frac{R_e}{R_e + R_F} \cdot \dot{I}_e \approx -\frac{R_e}{R_e + R_F} \cdot \dot{I}_o = \frac{R_e}{R_e + R_F} \frac{\dot{U}_o}{R_c}$$

$$\frac{\dot{U}_i}{R_1} \approx \frac{R_e}{R_e + R_F} \frac{\dot{U}_o}{R_c} \Rightarrow \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_c(R_e + R_F)}{R_e R_1}$$

本题的意图是针对集成运放组成的放大电路理解深度负反馈条件下闭环放大倍数的估算方法。

◆◆ 习题 6-6 如果要求当负反馈放大电路的开环放大倍数 $|A|$ 变化 25% 时, 其闭环放大倍数 $|A_f|$

的变化不超过 1%, 又要求闭环放大倍数为 100, 问 $|A|$ 至少应选多大? 这时反馈系数 $|F|$ 又应选多大?

解:
$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A} \Rightarrow \frac{1}{1+AF} = \frac{\frac{dA_f}{A_f}}{\frac{dA}{A}} = \frac{1\%}{25\%} = \frac{1}{25} \xrightarrow{\text{即}} 1+AF=25$$

$$A_f = \frac{A}{1+AF} \Rightarrow A = (1+AF)A_f = 25 \times 100 = 2500$$

$$1+AF=25 \Rightarrow AF=24 \Rightarrow F = \frac{24}{2500} = 0.0096 \approx 0.01$$

本题的意图是理解负反馈对提高放大倍数稳定性的作用, 而且提高的程度与反馈深度有关。

◆◆ 习题 6-7 假设单管共射放大电路在无反馈时的 $\dot{A}_{um} = -100, f_L = 30\text{Hz}, f_H = 3\text{kHz}$ 。如果反馈系数

$\dot{F}_{uu} = -10\%$, 问闭环后的 \dot{A}_{uf} 、 f_{Lf} 和 f_{Hf} 各等于多少?

解:

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{A}_{um}}{1 + \dot{A}_{um} \dot{F}_{uu}} = \frac{-100}{1 + (-100) \times (-10\%)} = \frac{-100}{11} \approx -9.09$$

$$f_{Lf} = \frac{1}{1 + \dot{A}_{um} \dot{F}_{uu}} \cdot f_L = \frac{30}{11} \text{Hz} \approx 2.73 \text{Hz}$$

$$f_{Hf} = (1 + \dot{A}_{um} \dot{F}_{uu}) f_H = (11 \times 3) \text{kHz} \approx 33 \text{kHz}$$

本题的意图是理解负反馈对展宽放大电路通频带的作用，展宽的程度与反馈深度有关。

◆◆ 习题 6-8 在图 P6-8 中：

- ① 电路中共有哪些(包括级间反馈和局部反馈)，分别说明它们的极性和组态。
- ② 如果要求 R_{F1} 只引入交流反馈， R_{F2} 只引入直流反馈，应该如何改变？(请画在图上)
- ③ 在第②小题情况下，上述两路反馈各对电路性能产生什么影响？
- ④ 在第②小题情况下，假设满足深负反馈条件，估算电压放大倍数 A_{uf} 。

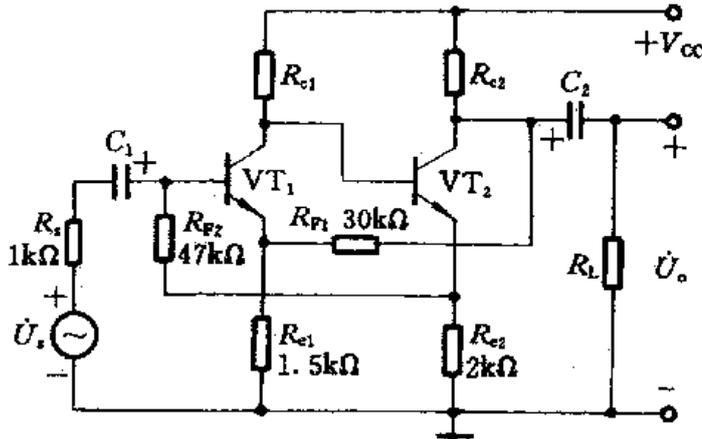


图 P6-8

解：

- ① (a) 局部反馈

R_{e1} 引入第一级电流串联负反馈； R_{e2} 引入第二级的电流串联负反馈。

- (b) 级间反馈

R_{F1} 引入电压串联负反馈； R_{F2} 引入电流并联负反馈。

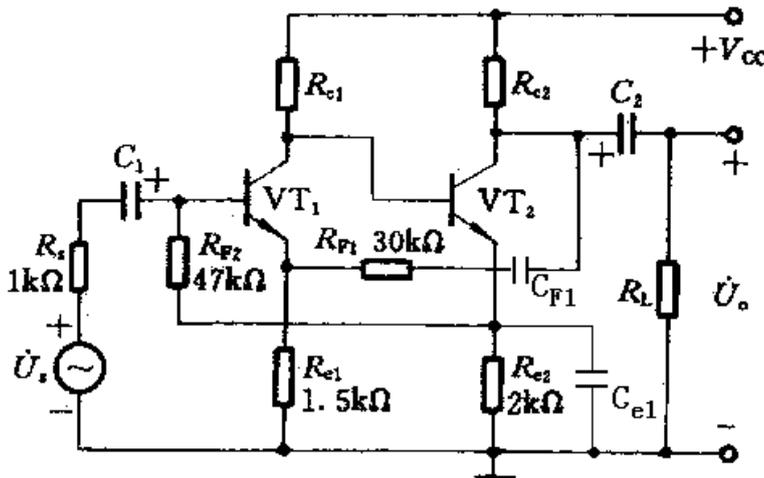
- ② 如图，只需接入一个电容 C_{F1} 与 R_{F1} 串联，再用一个大电容 C_{e2} 与 R_{e2} 并联即可。

③ C_{F1} 与 R_{F1} 引入交流电压串联负反馈，可稳定输出电压，提高输入电阻，降低输出电阻； C_{e2} 与 R_{e2} 引入直流负反馈可稳定放大电路的静态工作点。

- ④ C_{F1} 与 R_{F1} 引入深度的交流电压串联负反馈，有 $A_{uf} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_{F1}} \Rightarrow A_{uf} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_{e1} + R_{F1}}{R_{e1}} = 1 + \frac{R_{F1}}{R_{e1}} = 1 + \frac{30}{1.5} = 21$$

在第②小题情况下，假设满足深负反馈条件，估算电压放大倍数 A_{usf} 。



本题的意图是训练判断反馈的类型和作用，理解交流反馈和直流反馈引入方法的区别，并估算深度负反馈放大电路的电压放大倍数。

◆◆ 习题 6-9 分别判断图 P6-9 各电路中反馈的极性和组态，如为正反馈，试改接成为负反馈，并估算各电路的电压放大倍数。设其中的集成运放均为理想运放。

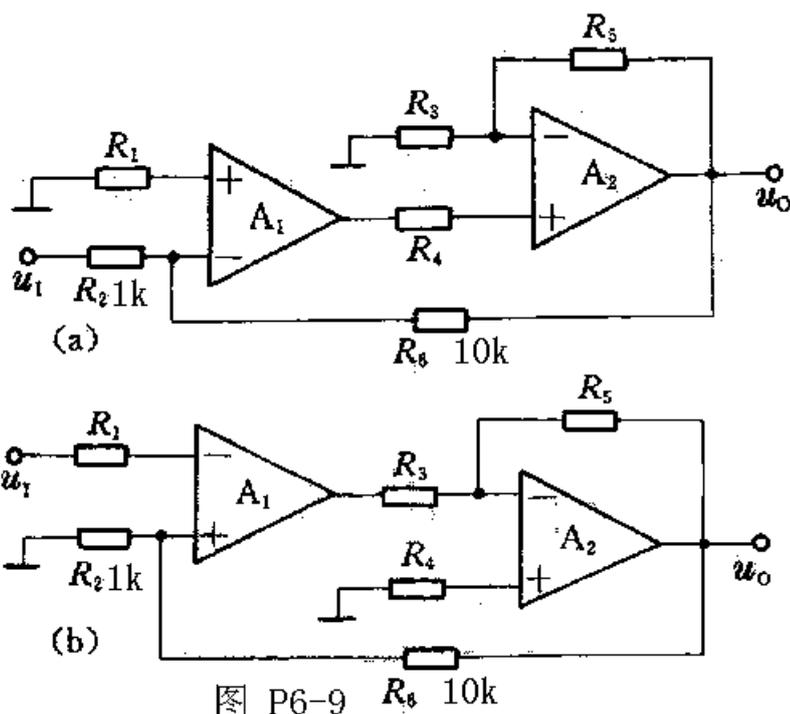


图 P6-9 R_6 10k

解：

(a) 主要由 R_6 引入级间的电压并联负反馈（另由 R_5 引入第二级的局部电压串联负反馈）。

两级的理想集成运放应能提供足够大的开环增益，因此上述级间反馈应满足深度负反馈条件，

即 R_6 引入深度的电压并联负反馈，有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{U}_1}{R_2} \quad \dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_o}{R_6} \quad \frac{\dot{U}_1}{R_2} \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_6} \Rightarrow \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_1} \approx -\frac{R_6}{R_2} = -\frac{10}{1} = -10$$

(b) 主要由 R_6 引入级间的电压串联负反馈（另由 R_5 引入第二级的局部电压并联负反馈）。

两级的理想集成运放应能提供足够大的开环增益，因此上述级间反馈应满足深度负反馈条件，

即 R_6 引入深度的电压串联负反馈，有 $A_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R_2}{R_2 + R_6} \Rightarrow A_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_2 + R_6}{R_2} = 1 + \frac{R_6}{R_2} = 1 + \frac{10}{1} = 11$$

本题的意图是训练判断由多个集成运放组成的放大电路中反馈的类型，并估算闭环电压放大倍数。

◆◆ 习题 6-10 图 P6-10 是 MF20 万用表前置放大级的电路原理图：

① 试分析电路中共有几路级间反馈，分别说明各路反馈的极性和交、直流性质，如为交流反馈，进一步分析它们的组态；

② 分别说明上述反馈对放大电路产生何种影响；

③ 试估算放大电路的电压放大倍数。

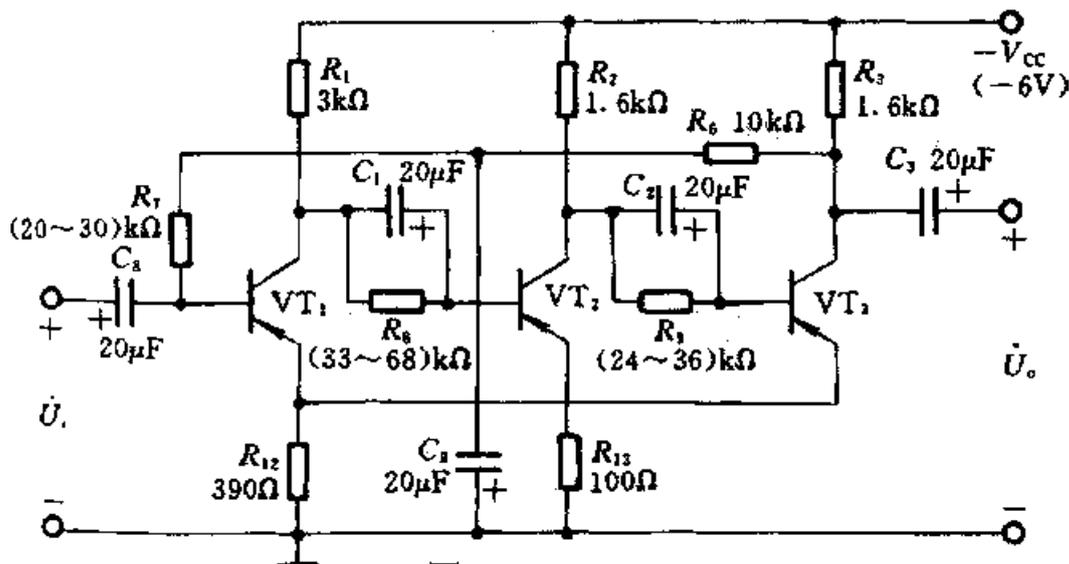


图 P6-10

解：

① 有两路级间反馈：

(a) 第一路从 e3 直接引回到 e1，是交直流电流串联负反馈；

(b) 第二路从 c3 通过两个电阻 R6 和 R7 引回到 b1，R6 和 R7 之间通过一个大电容 C9 接地，可以认为 C9 两端的交流电压降近似为零，因此，该路仅为直流负反馈。

② (a) 第一路交直流电流串联负反馈的作用除了稳定静态工作点外，还可以稳定输出电流，提高输入电阻，展宽通频带，改善输出波形等；

(b) 第二路直流负反馈仅能稳定静态工作点。

③ 第一路反馈中的交流电流串联负反馈应能满足深度负反馈的条件，因此有：

$$\dot{U}_i \approx \dot{U}_f = -\dot{I}_{e3} R_{12} \approx -\dot{I}_{c3} R_{12} \quad \dot{U}_o = \dot{I}_{c3} (R_3 // R_6)$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_{c3} (R_3 // R_6)}{-\dot{I}_{c3} R_{12}} = -\frac{R_3 // R_6}{R_{12}} = -\frac{1.6 // 10}{390 \times 10^{-3}} \approx 3.54$$

本题的意图是结合一个实际的电子仪器中的放大电路，分析反馈的类型和作用，估算闭环电压放大倍数。

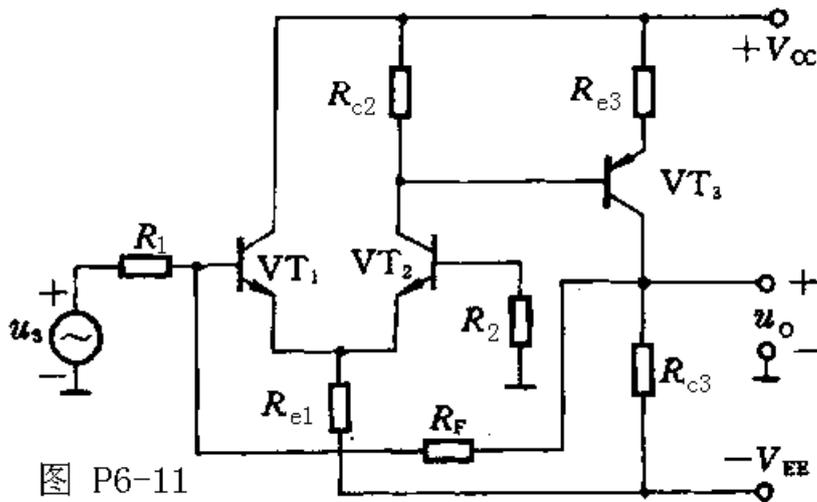


图 P6-11

◆◆ 习题 6-11 在图 P6-11 所示电路中：

- ① 试判断级间反馈的极性和组态；
- ② 该反馈对电路的放大倍数和输入、输出电阻有何影响(增大、减小或基本不变)?

③ 如为负反馈，假设满足 $|1 + A\dot{F}| \gg 1$ 的条件，估算电压放大倍数；如为正反馈，请在原电路的基础上改为负反馈。

解：

- ① R_F 引入级间电压并联负反馈。
- ② 该反馈降低电压放大倍数、减小输入电阻、减小输出电阻。
- ③ 假设此反馈满足 $|1 + A\dot{F}| \gg 1$ 的条件，即为深度的电压并联负反馈，则有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_s}{R_1} \quad \dot{I}_f \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \quad \frac{\dot{U}_s}{R_1} \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \Rightarrow \dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx -\frac{R_F}{R_1}$$

本题的意图是训练判断反馈的极性、组态和作用，以及估算深度负反馈放大电路的闭环电压放大倍数。

◆◆ 习题 6-12 试比较图 P6-12(a)和(b)电路中的反馈：

- ① 分别说明两个电路中反馈的极性和组态；
- ② 分别说明上述反馈在电路中的作用；
- ③ 假设两个电路中均为输入端电阻 $R_1=1k\Omega$ ，反馈电阻 $R_F=10k\Omega$ ，分别估算两个电路的闭环电

压放大倍数 $A_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ 各等于多少。

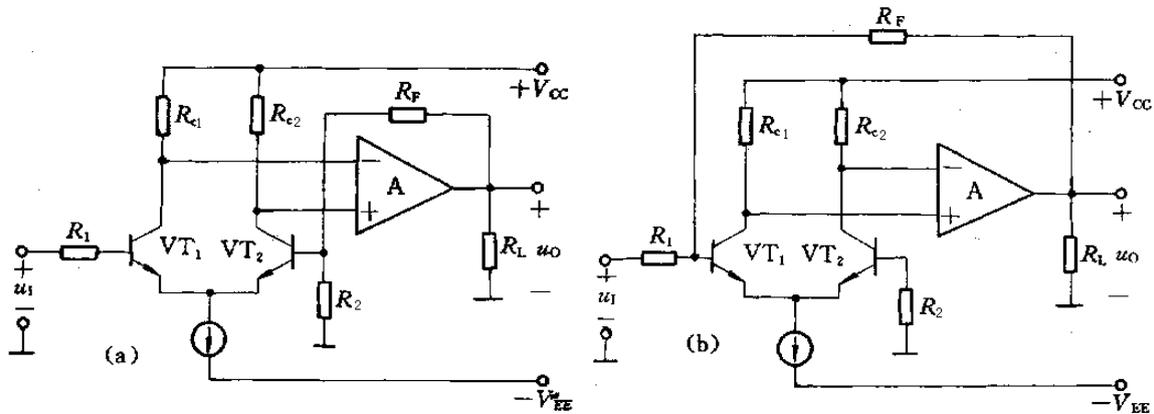


图 P6-12

解:

① (a) R_F 引入电压串联负反馈; (b) R_F 引入电压并联负反馈。

② (a) 中的反馈可稳定输出电压, 提高输入电阻, 降低输出电阻; (b) 中的反馈可稳定输出电压, 降低输入电阻, 降低输出电阻。

③ (a) 此反馈应为深度电压串联负反馈, 则有 $A_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R_2}{R_2 + R_F} \Rightarrow A_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_2 + R_F}{R_2} = \frac{R_1 + R_F}{R_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{10}{1} = 11$$

(b) 此反馈应为深度电压并联负反馈, 则有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R_1} \quad \dot{I}_f \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \quad \frac{\dot{U}_i}{R_1} \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \Rightarrow \dot{A}_{uf} = -\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{10}{1} = -10$$

本题的意图是针对两个结构相似, 但实质上反馈组态根本不同的放大电路, 要求通过对比理解不同组态的负反馈对电路产生的不同作用, 而且其闭环电压放大倍数的估算方法也不同。

◆◆ 习题 6-13 在图 P6-13 电路中要求达到以下效果, 应该引入什么反馈? 将答案写在括弧内。

① 提高从 b_1 端看进去的输入电阻;

(接 R_F 从_____到_____)

② 减少输出电阻;

(接 R_F 从_____到_____)

③ 希望 R_{c3} 改变时, 其上的 I_o =(在给定 U_i 情况下的交流电流有效值)基本不变;

(接 R_F 从_____到_____)

④ 希望各级静态工作点基本稳定;

(接 R_F 从_____到_____)

⑤ 希望在输出端接上负载电阻 R_L 后, U_o =(在给定 U_i 情况下的输出交流电压有效值)基本不变;

(接 R_F 从_____到_____)

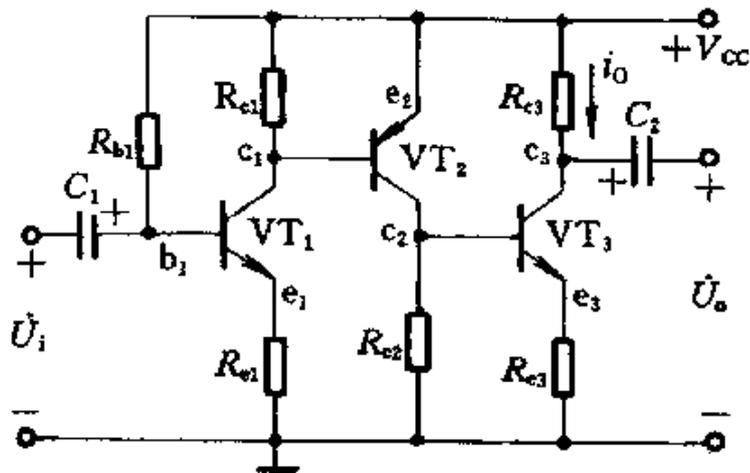


图 P6-13

解:

① 提高从 b_1 端看进去的输入电阻;

(接 R_F 从 **e3** 到 **e1**)

② 减少输出电阻;

(接 R_F 从 **c3** 到 **b1**)

③ 希望 R_{c3} 改变时, 其上的 I_o =(在给定的 U_i 情况下的交流电流有效值)基本不变;

(接 R_F 从 **e3** 到 **e1**)

④ 希望各级静态工作点基本稳定;

(接 R_F 从 **e3** 到 **e1**)

⑤ 希望在输出端接上负载电阻 R_L 后, U_o =(在给定的 U_i 情况下的输出交流电压有效值)基本不变;

(接 R_F 从 **c3** 到 **b1**)

本题的意图是理解负反馈对放大电路性能的影响, 练习根据实际要求在电路中引入适当的负反馈。

◆◆ 习题 6-14 在图 P6-14 中, 为了实现下列要求, 试说明应分别引入何种级间反馈, 从哪一点到哪一点。请画在图上, 并在反馈支路上分别注明①、②、③。

① 提高输入电阻;

② 稳定输出电流;

③ 仅稳定各级静态工作点, 但不改变 A_u 、 R_i 、 R_o 等动态性能。

④ 在上述第①小题的情况下, 假设满足深负反馈条件, 为了得到 $A_{uf} = 20$, 反馈支路的电阻 R_{F1} 应为多大?

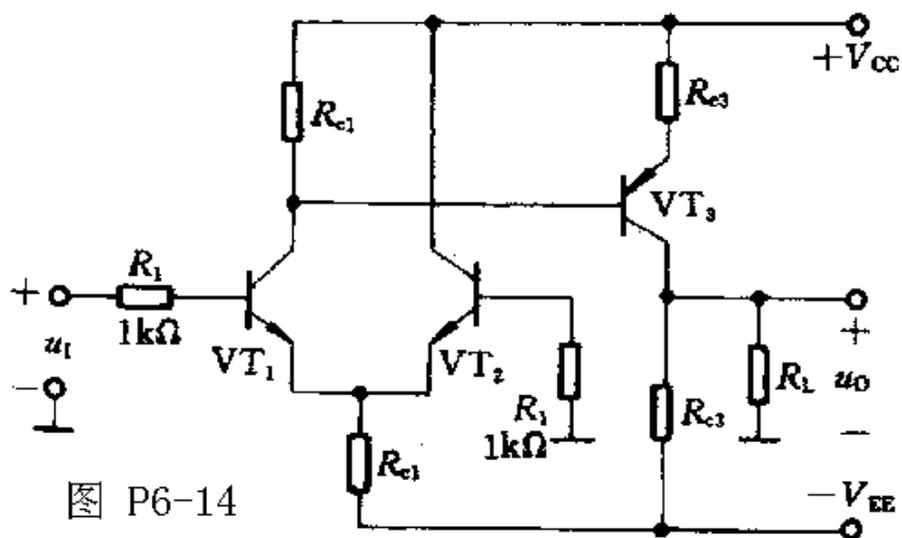


图 P6-14

解:

- ① 应引入串联负反馈, 从 c_3 通过 R_{F1} 连接 b_2 。
- ② 应引入电流负反馈, 从 e_3 通过 R_{F2} 连接 b_1 。
- ③ 应仅引入直流负反馈, (a) 从 c_3 通过 R_{F3} 连接 b_2 , 同时在 VT_2 的基极电阻 R_2 上并联一个大电容; 或从 e_3 通过 R_{F3} 连接 b_1 , 并在 R_{c3} 上并联一个大电容。

- ④ 上述第①小题的情况下, 引入了电压串联负反馈, 假设满足深负反馈条件且 $A_{uf} = 20$, 则

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R_2}{R_2 + R_F} \Rightarrow A_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_2 + R_F}{R_2} = 20 \Rightarrow R_F = 19R_2 = 19k\Omega$$

本题的意图是理解负反馈对放大电路性能的影响, 练习根据实际要求在电路中引入适当的负反馈。

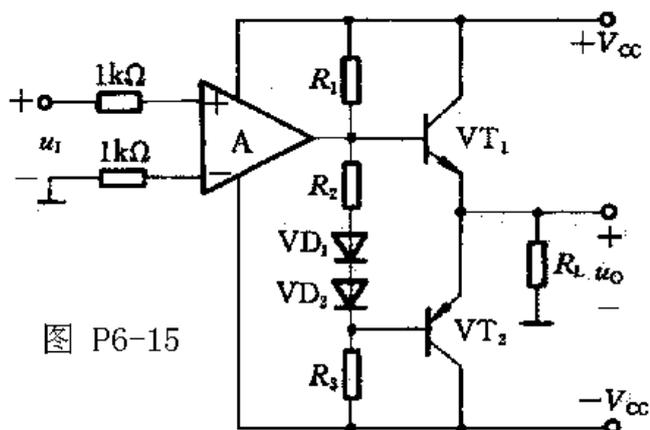


图 P6-15

◆◆ 习题 6-15 在图 P6-15 所示的电路中:

- ① 为了提高输出级的带负载能力, 减小输出电压波形的非线性失真, 试在电路中引入一个级间负反馈(画在图上);

② 试说明此反馈的组态;

③ 若要求引入负反馈后的电压放大倍数 $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 20$, 试选择反馈电阻的阻值。

解:

① 从输出端通过电阻 R_F 连接集成运放的反相输入端;

② 因为提高输出级的带负载能力, 减小输出电压波形的非线性失真, 需要引入电压负反馈, 如①中说明, 引入了一个电压串联负反馈;

③ 上述第①小题的情况下, 引入了电压串联负反馈, 假设满足深负反馈条件且 $\dot{A}_{uf} = 20$, 若运放输入端电阻名称为 R , 则

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R}{R + R_F} \Rightarrow \dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R + R_F}{R} = 20 \Rightarrow R_F = 19R = 19k\Omega$$

本题的意图是对根据实际要求引入适当的负反馈, 以及选择反馈支路的参数进行综合训练。

◆◆ 习题 6-16 图 P6-16 所示为一个扩大机的简化电路。试回答以下问题:

① 为了要实现互补推挽功率放大, VT_1 和 VT_2 应分别是什么类型的三极管 (PNP, NPN)? 在图中画出发射极箭头方向。

② 若运算放大器的输出电压幅度足够大, 是否可能在输出端得到 8W 的交流输出功率? 设 VT_1 和 VT_2 的饱和管压降 U_{CES} 均为 1V。

③ 若集成运放的最大输出电流为 $\pm 10mA$, 则为了要得到最大输出电流, VT_1 和 VT_2 的 β 值应不低于什么数值?

④ 为了提高输入电阻, 降低输出电阻并使放大性能稳定, 应该如何通过 R_F 引入反馈? 在图中画出连接方式。

⑤ 在上题情况下, 如要求 $U_S=100mV$ 时 $U_O=5V$, $R_F=?$

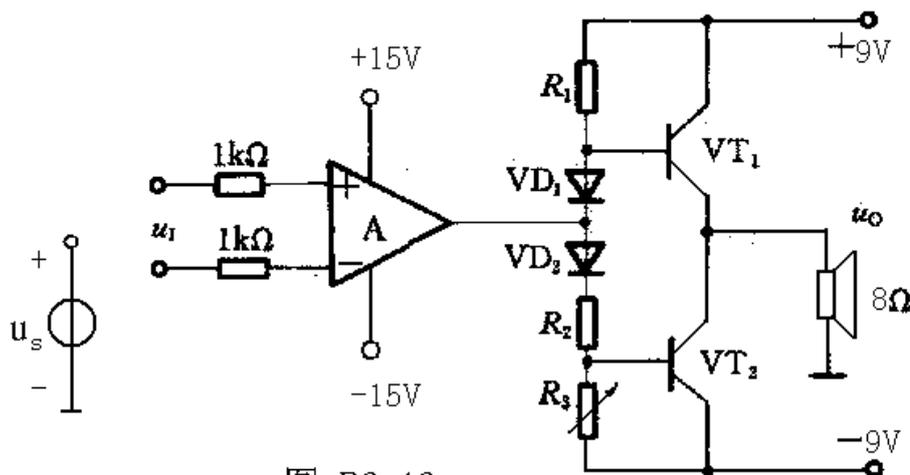


图 P6-16

解:

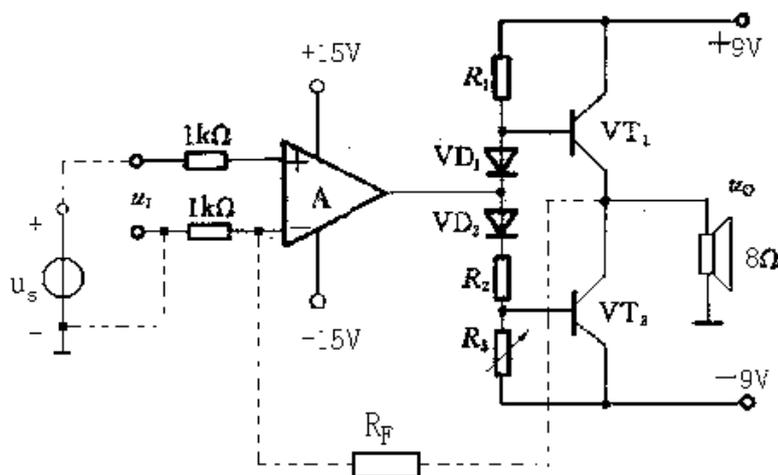
① VT_1 为 NPN 型, VT_2 为 PNP 型, 两管发射极相连并作为输出端接负载 (扬声器)。

② 理论上的最大输出功率为: $P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = \frac{(9-1)^2}{2 \times 8} W = 4W$, 因此, 即使运算放

大器的输出电压幅度足够大，也不可能输出端得到 8W 的交流输出功率。

③ 功放管的理论最大输出电流 $I_{cm} = U_{cem} / R_L = (V_{CC} - U_{CES}) / R_L = 1A$ ，则 VT1 和 VT2 的共射电流放大系数应为 $\beta > \frac{1000}{10} = 100$ 。

④ 为了提高输入电阻，降低输出电阻并使放大性能稳定，应该通过 R_F 引入电压串联负反馈。如下图所示。



⑤ 若通过 R_F 引入了深度电压串联负反馈，同时若运放输入端电阻名称为 R ，则

$$\dot{F}_{um} \approx \frac{R}{R + R_F} \Rightarrow A_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{um}} = \frac{R + R_F}{R} = \frac{5V}{100mV} = 50 \Rightarrow R_F = 49R = 49k\Omega$$

本题的意图是对集成运放、OCL 互补对称功率放大电路和负反馈进行综合训练。

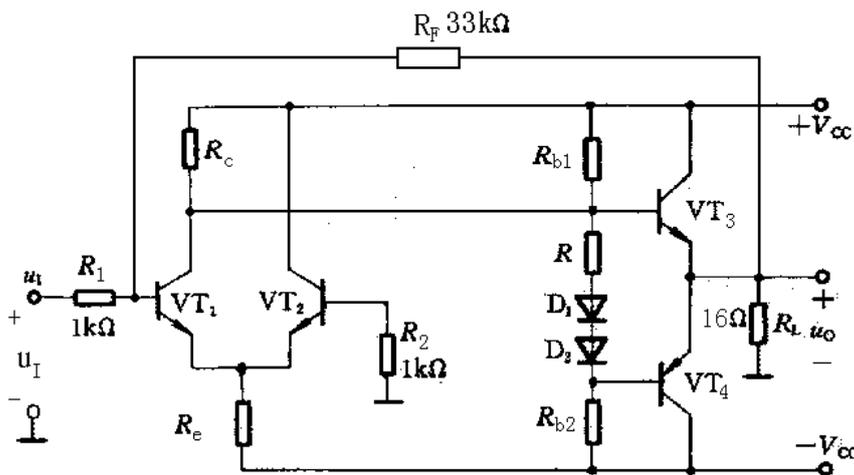


图 P6-17

◆◆ 习题 6-17 图 P6-17 电路中：

- ① 要求 $P_{om} \geq 8W$ ，已知三极管 VT3、VT4 的饱和管压降 $U_{CES} = 1V$ ，则 V_{CC} 至少应为多大？
- ② 判断级间反馈的极性和组态，如为正反馈，将其改为负反馈。

③ 假设最终满足深度负反馈条件, 估算? $\dot{A}_{uf} = \dot{U}_o / \dot{U}_i = ?$

解:

$$\textcircled{1} P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \Rightarrow V_{CC} = \sqrt{2R_L P_{om}} + U_{CES} = (\sqrt{2 \times 16 \times 8} + 1)V = 17V$$

即要求 $P_{om} \geq 8W$, 若已知三极管 VT3、VT4 的饱和管压降 $U_{CES}=1V$, 则 V_{CC} 至少应为 17V。

② 级间反馈主要由 R_F 引入, 其极性和组态为电压并联负反馈。

③ 假设最终满足深度负反馈条件, 则级间反馈为深度的电压并联负反馈, 有 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

$$\dot{I}_i \approx \frac{\dot{U}_i}{R_1} \quad \dot{I}_f \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \quad \frac{\dot{U}_i}{R_1} \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_F} \Rightarrow \dot{A}_{uf} = -\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{33}{1} = -33$$

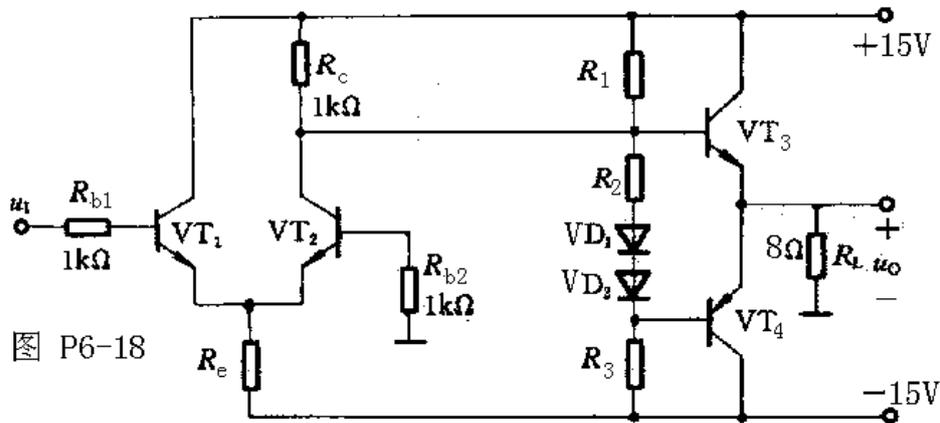
本题的意图是对差分放大电路、OCL 互补对称功率放大电路和负反馈进行综合训练。

◆◆ 习题 6-18 图 P6-18 电路中:

① 若三极管 VT3、VT4 的饱和管压降 $U_{CES}=1V$, 试求电路的最大输出功率 $P_{om}=?$

② 为了提高带负载能力, 减小非线性失真, 请在图中通过 R_F 引入一个级间负反馈。请画在图上。

③ 如要求引入反馈后的电压放大倍数 $|\dot{U}_o / \dot{U}_i| \approx 100$, 则 R_F 的阻值应为多大?



解:

$$\textcircled{1} P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} = \frac{(15-1)^2}{2 \times 8} W = 12.25W$$

② 为了提高带负载能力, 减小非线性失真, 如图所示, 可通过 R_F 连接放大电路的输出端和 VT2 基极而引入一个级间电压串联负反馈。

③ 引入的反馈应能满足深度负反馈的条件, 则 $A_{uf} \approx \frac{1}{F_{uu}}$, 而

$$\dot{F}_{uu} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b2} + R_F} \Rightarrow A_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_{b2} + R_F}{R_{b2}} \approx 100 \Rightarrow R_F = 99R_{b2} = 99k\Omega$$

本题的意图也是对差分放大电路、OCL 互补对称功率放大电路和负反馈进行综合训练。

第七章 习题与思考题

◆◆ 习题 7-1 在图 P7-1 所示的放大电路中，已知 $R_1=R_2=R_5=R_7=R_8=10k\Omega$ ， $R_6=R_9=R_{10}=20k\Omega$ ：

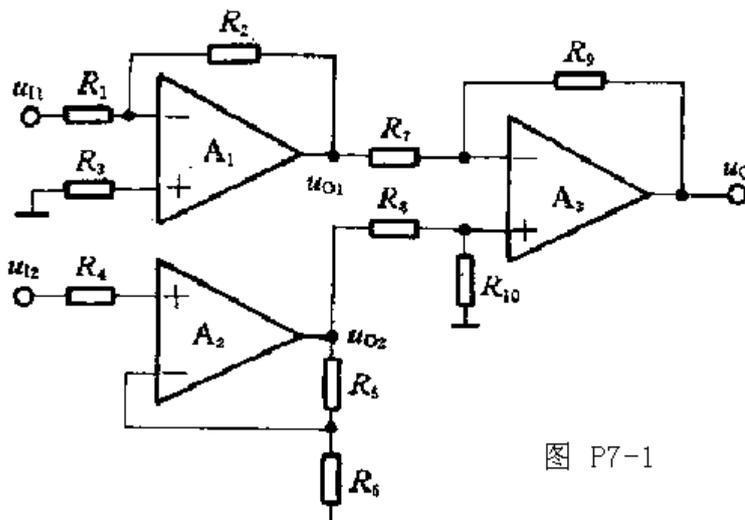


图 P7-1

① 试问 R_3 和 R_4 分别应选用多大的电阻；

② 列出 u_{o1} 、 u_{o2} 和 u_o 的表达式；

③ 设 $u_{i1}=3V$ ， $u_{i2}=1V$ ，则输出电压 $u_o=?$

解：

$$\textcircled{1} R_3 = R_1 // R_2 = (10 // 10)k\Omega = 5k\Omega, \quad R_4 = R_5 // R_6 = (10 // 20)k\Omega \approx 6.67k\Omega$$

$$\textcircled{2} u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1}u_{i1} = -\frac{10}{10}u_{i1} = -u_{i1}, \quad u_{o2} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)u_{i2} = \left(1 + \frac{10}{20}\right)u_{i2} = 1.5u_{i2},$$

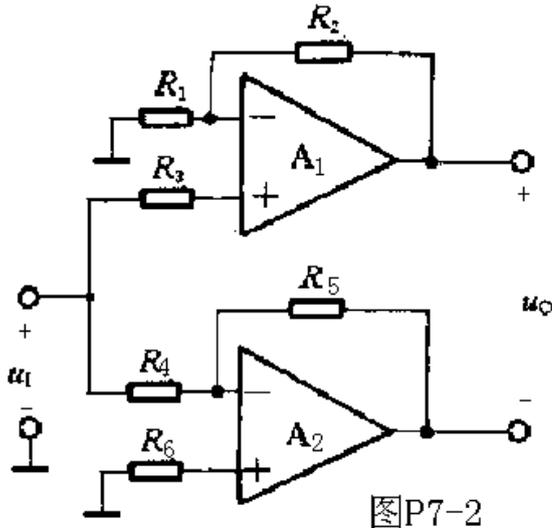
$$u_o = -\frac{R_9}{R_7}(u_{o1} - u_{o2}) = -\frac{20}{10}(-u_{i1} - 1.5u_{i2}) = 2u_{i1} + 3u_{i2}$$

$$\textcircled{3} u_o = 2u_{i1} + 3u_{i2} = (2 \times 3 + 3 \times 1)V = 9V$$

本题的意图是掌握反相输入、同相输入、差分输入比例运算电路的工作原理，估算三种比例电路的输入输出关系。

◆◆ 习题 7-2 在图 P7-2 所示电路中，写出其输出电压 u_o 的表达式。

解：



图P7-2

$$\begin{aligned}
 u_o &= (1 + \frac{R_2}{R_1})u_1 - (-\frac{R_5}{R_4})u_1 \\
 &= [(1 + \frac{R_2}{R_1})u_1 + \frac{R_5}{R_4}]u_1
 \end{aligned}$$

本题的意图是掌握反相输入和同相输入比例电路的输入、输出关系。

◆◆ 习题 7-3 试证明图 P7-3 中, $u_o = (1 + \frac{R_1}{R_2})(u_{i2} - u_{i1})$

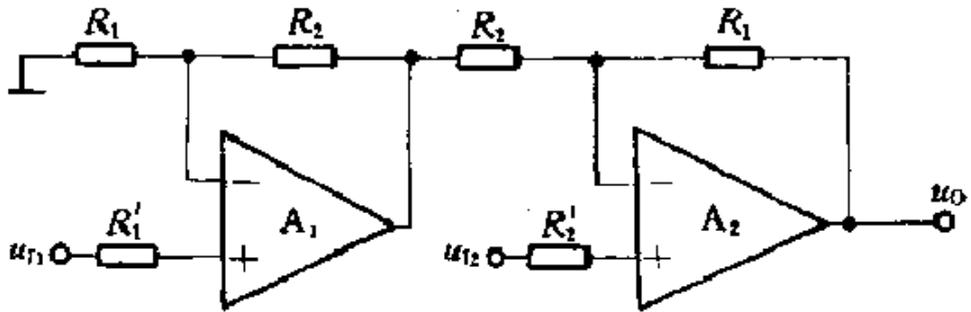


图 P7-3

解:

$$u_{o1} = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_{i1}$$

$$\begin{aligned}
 u_o &= -\frac{R_1}{R_2}u_{o1} + (1 + \frac{R_1}{R_2})u_{i2} = -\frac{R_1}{R_2}(1 + \frac{R_2}{R_1})u_{i1} + (1 + \frac{R_1}{R_2})u_{i2} \\
 &= -(1 + \frac{R_1}{R_2})u_{i1} + (1 + \frac{R_1}{R_2})u_{i2} = (1 + \frac{R_1}{R_2})(u_{i2} - u_{i1})
 \end{aligned}$$

本题的意图是掌握反相输入和同相输入比例电路的输入、输出关系。

◆◆ 习题 7-4 在图 P7-4 所示电路中，列出 u_o 的表达式。

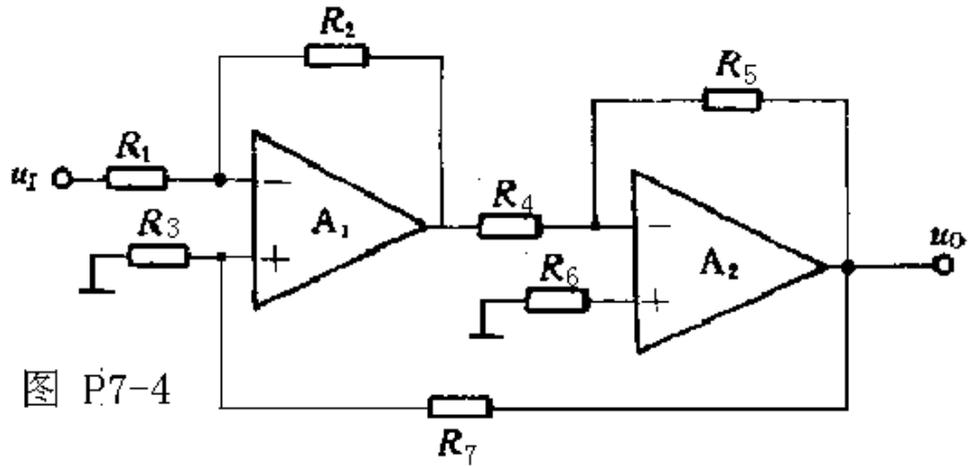


图 P7-4

解:

反馈组态应为深度电压串联负反馈，因此有 $\dot{A}_{uf} = 1/\dot{F}_{uu}$

$$\dot{F}_{uu} = \frac{R_3}{R_3 + R_7} \Rightarrow \dot{A}_{uf} = \frac{R_3 + R_7}{R_3} = 1 + \frac{R_7}{R_3} \Rightarrow u_o = (1 + \frac{R_7}{R_3})u_i \xrightarrow{\text{若 } R_3=R_1} u_o = (1 + \frac{R_7}{R_1})u_i$$

◆◆ 习题 7-5 列出图 P7-5 所示电路中输出电压 u_o 的表达式。

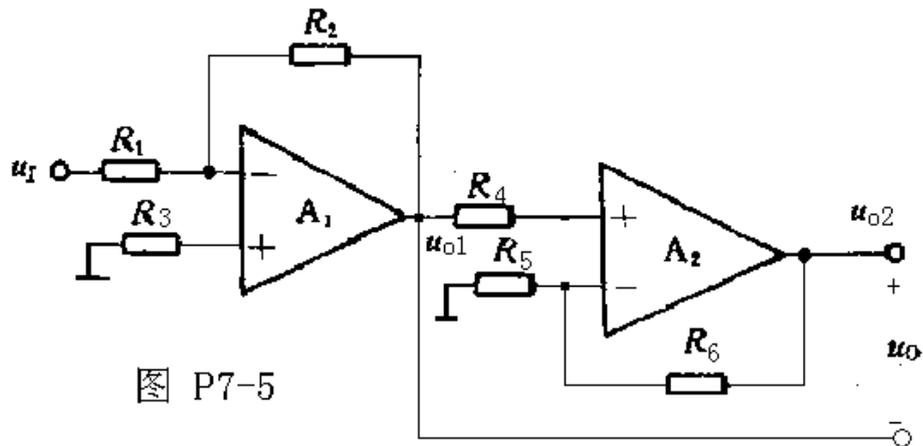


图 P7-5

解:

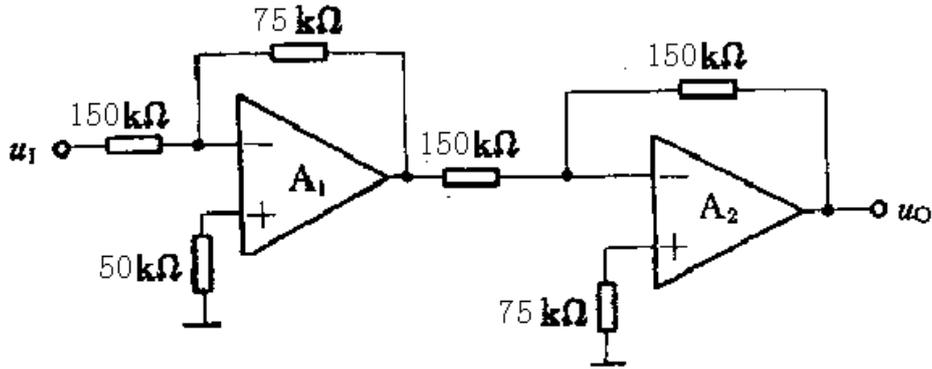
$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_i \quad u_{o2} = (1 + \frac{R_6}{R_5}) u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{R_6}{R_5}) u_i = -\frac{R_2}{R_1} u_i - \frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} u_i$$

$$u_o = u_{o2} - u_{o1} = -\frac{R_2 R_6}{R_1 R_5} u_i$$

本题的意图是掌握反相输入和同相输入比例运算电路的输入、输出关系。

◆◆ 习题 7-6 试设计一个比例运算放大器，实现以下运算关系： $u_o=0.5u_i$ 。请要求画出电路原理图，并估算各电阻的阻值。希望所用电阻的阻抗在 $20k\Omega$ 至 $200k\Omega$ 的范围内。

解：



上图为实现本题目要求的一种设计方案，使 $A_{uf} = A_{uf1} \cdot A_{uf2} = (-0.5) \times (-1) = 0.5$ ，即

$$u_o = 0.5u_i。$$

本题的意图是在深入掌握各种比例运算电路性能的基础上，采用适当电路实现给定的运算关系。以上只是设计方案之一。

◆◆ 习题 7-7 在图 7.2.5 所示的三运放数据放大器中，假设 R_1 为阻值在 $1k\Omega \sim 10k\Omega$ 之间可调的电位器， $R_2=R_3=20k\Omega$ ， $R_4=R_5=33k\Omega$ ， $R_6=R_7=100k\Omega$ ，试估算电路的输出电压与输入电压之间的比例系数的可调范围。

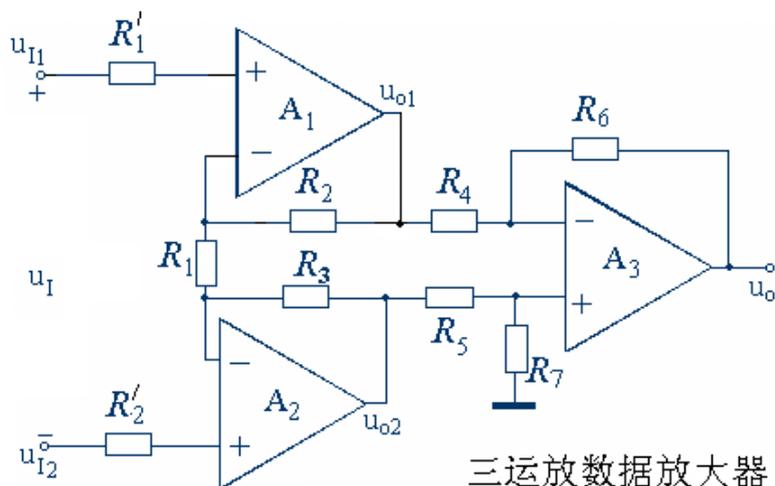


图 7.2.5

解:

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1/2}\right) \cdot u_{i1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \cdot u_{i1} \quad u_{o2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1/2}\right) \cdot u_{i2} = \left(1 + \frac{2R_3}{R_1}\right) \cdot u_{i2}$$

$$u_{o1} - u_{o2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{i1} - u_{i2}) = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)u_I \quad u_o = -\frac{R_6}{R_4}(u_{o1} - u_{o2}) = -\frac{R_6}{R_4}\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)u_I$$

输出电压与输入电压之间的比例系数即 $A_u = \frac{u_o}{u_I}$,

$$\text{当 } R_1 \text{ 阻值为 } 1 \text{ k}\Omega \text{ 时, } A_u = -\frac{100}{33}\left(1 + \frac{2 \times 20}{1}\right) \approx -124.2,$$

$$\text{当 } R_1 \text{ 阻值为 } 10 \text{ k}\Omega \text{ 时, } A_u = -\frac{100}{33}\left(1 + \frac{2 \times 20}{10}\right) \approx -15.2。$$

本题的意图是了解三运放数据放大器的特点, 并学习估算其电压放大倍数。

◆◆ 习题 7-8 在图 P7.2.8 所示的 T 型反馈网络比例电路中, 已知 $R_1=1\text{M}\Omega$, $R_2=330\text{k}\Omega$, $R_3=510\text{k}\Omega$, $R_4=1\text{k}\Omega$, 试列出电路的输出输入关系, 并估算输入电阻 R_i 。

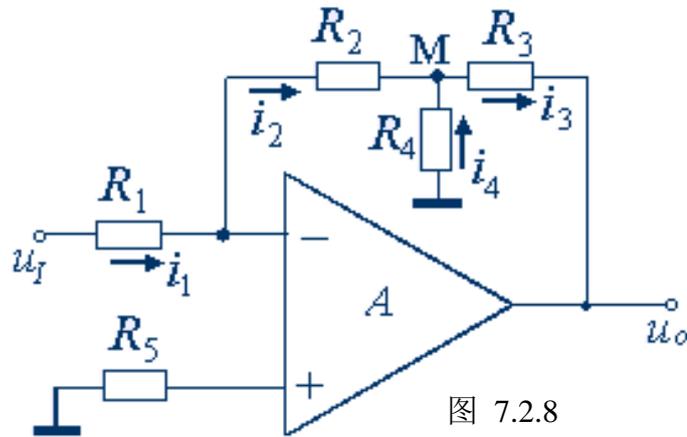


图 7.2.8

解:

$$u_o = -(i_2 R_2 + i_3 R_3) \xrightarrow{i_3=i_2+i_4} u_o = -[i_2 R_2 + (i_2 + i_4) R_3], \quad u_M = -i_2 R_2 = -i_4 R_4 \Rightarrow i_4 = \frac{R_2}{R_4} i_2$$

$$u_o = -[i_2 R_2 + (i_2 + \frac{R_2}{R_4} i_2) R_3] = -i_2 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4} \right) \xrightarrow{i_2=i_1=\frac{u_I}{R_1}} u_o = -\frac{R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4}}{R_1} u_I$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4}}{R_1}, \quad R_{if} = R_1 = 1M\Omega$$

本题的意图是了解T型反馈网络比例电路的特点，学习估算电压放大倍数和输入电阻。

◆◆ 习题 7-9 写出图 P7-9(a)和(b)所示运算电路的输入输出关系。

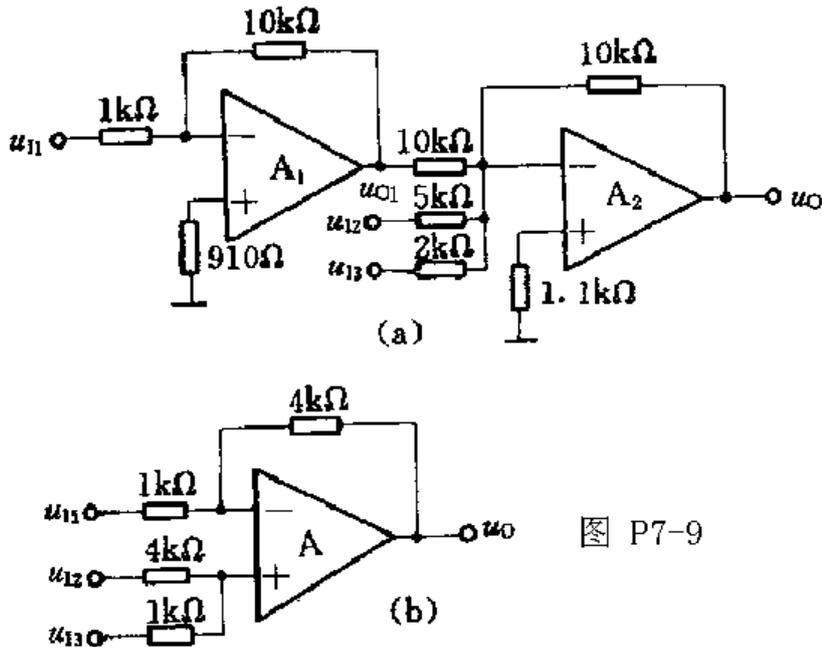


图 P7-9

解:

$$(a) \quad u_{o1} = -\frac{10}{1}u_{i1} = -10u_{i1}$$

$$u_o = -\left(\frac{10}{10}u_{o1} + \frac{10}{5}u_{i2} + \frac{10}{2}u_{i3}\right) = -\left[\frac{10}{10} \times (-10u_{i1}) + \frac{10}{5}u_{i2} + \frac{10}{2}u_{i3}\right] = 10u_{i1} - 2u_{i2} - 5u_{i3}$$

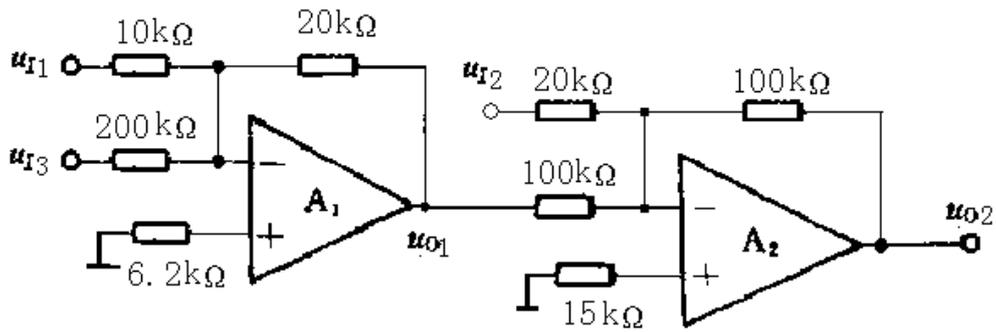
$$(b) \quad u_o = -\frac{4}{1}u_{i1} + \left(1 + \frac{4}{1}\right) \times \frac{1}{1+4}u_{i2} + \left(1 + \frac{4}{1}\right) \times \frac{4}{1+4}u_{i3} = -4u_{i1} + u_{i2} + 4u_{i3}$$

本题的意图是对比例电路及求和电路进行综合训练。

◆◆ 习题 7-10 试用集成运放组成一个运算电路，要求实现以下运算关系：

$$u_o = 2u_{i1} - 5u_{i2} + 0.1u_{i3}$$

解:



如上图所示，采用两级反相求和电路实现给定的运算关系，使第一级：
 $u_{O1} = -(2u_{I1} + 0.1u_{I3})$ ；第二级： $u_{O2} = -(u_{O1} + 5u_{I2}) = 2u_{I1} - 5u_{I2} + 0.1u_{I3}$ 。

本题的意图是对求和电路进行综合训练，学习用适当电路实现加法和减法的复合运算关系。

◆◆ 习题 7-11 在图 P7-11(a)电路中，已知 $R_1=100\text{k}\Omega$ ， $R_2=R_F=200\text{k}\Omega$ ， $R'=51\text{k}\Omega$ ， u_{I1} 和 u_{I2} 的波形如图 P7-11(b)所示，试画出输出电压 u_o 的波形，并在图上标明相应电压的数值。

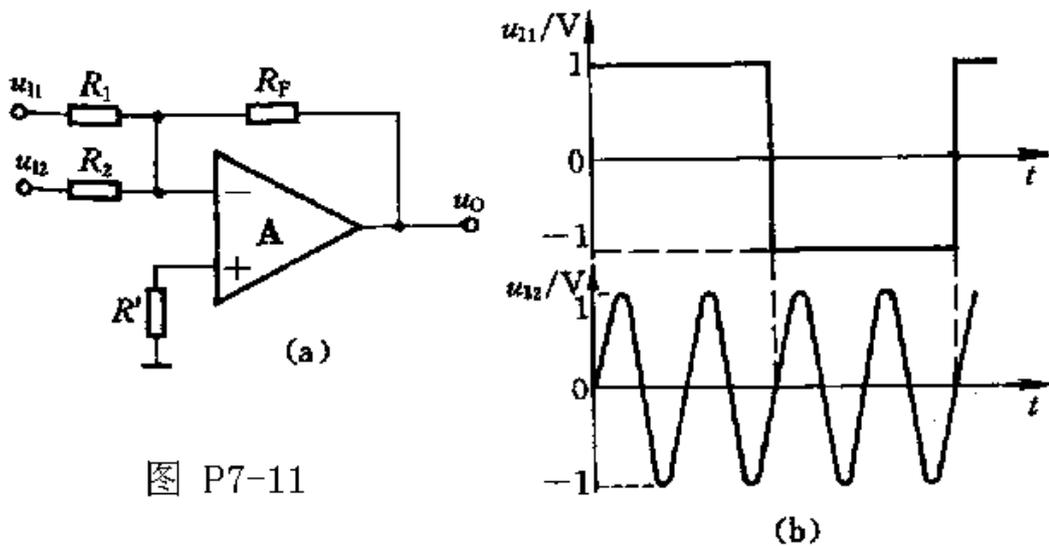
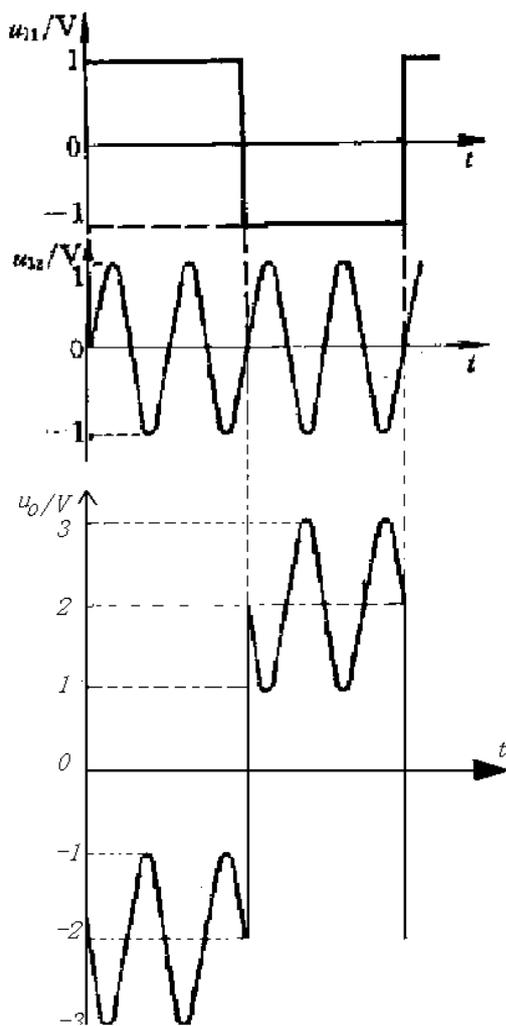


图 P7-11

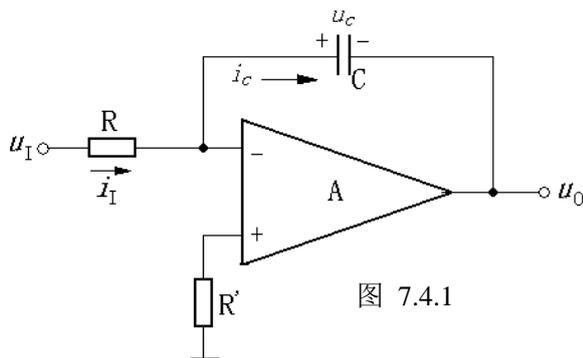
解：

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1}u_{I1} - \frac{R_F}{R_2}u_{I2} = -\frac{200}{100}u_{I1} - \frac{200}{200}u_{I2} = -2u_{I1} - u_{I2}$$

本题的意图是掌握求和电路的工作原理，并学习利用波形叠加的方法画求和电路输出电压波形。



◆◆ 习题 7-12 在图 7.4.1 所示的基本积分电路中, 设 $u_i=2\sin \omega t(\text{V})$, $R=R'=10\text{k}\Omega$, $C=1\mu\text{F}$, 试求 u_o 的表达式, 并计算当 $f=10\text{Hz}$ 、 100Hz 、 1000Hz 和 10000Hz 时 u_o 的幅度(有效值)和相位, 最后画出电路的幅频特性和相频特性。



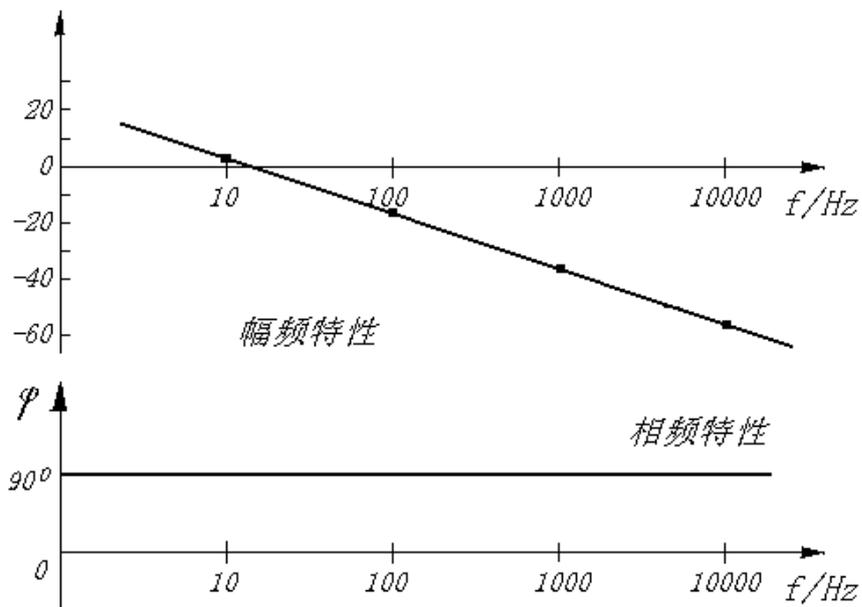
解:

$$\begin{aligned}
 u_o &= -\frac{1}{RC} \int u_i dt = -\frac{1}{RC} \int 2\sin \omega t dt = \frac{2}{\omega RC} \cos \omega t \\
 &= \frac{2}{10^4 \times 10^{-6} \omega} \cos \omega t = \frac{200}{\omega} \cos \omega t = \frac{200}{\omega} \sin(\omega t + 90^\circ)
 \end{aligned}$$

依据此式可计算出当 $f=10\text{Hz}$ 、 100Hz 、 1000Hz 和 10000Hz 时 u_o 的幅度(有效值)和相位, 如下表所示。

U_i / V	$2/\sqrt{2} = \sqrt{2} \approx 1.414$			
f / Hz	10	100	1000	10000
U_o / V	2.25	0.225	0.0225	0.00225
\dot{U}_o / \dot{U}_i	1.59	0.159	0.0159	0.00159
$20\lg \dot{U}_o / \dot{U}_i / \text{dB}$	4	-16	-36	-56
φ	90°	90°	90°	90°

电路的幅频特性和相频特性如下图所示。



本题的意图是, 当积分电路的输入信号为正弦波时, 通过分析其输入、输出关系, 体会积分电路的移相作用, 并学习画出积分电路的幅频特性和相频特性。

◆◆ 习题 7-13 设输入到图 7.4.1 所示积分电路的 $u_i(t)$ 如图 P7-13 中所示, 试画出相应的 $u_o(t)$ 波形图。设 $t=0$ 时 $u_o=0$, $R=R'=10\text{k}\Omega$, $C=1\mu\text{F}$ 。

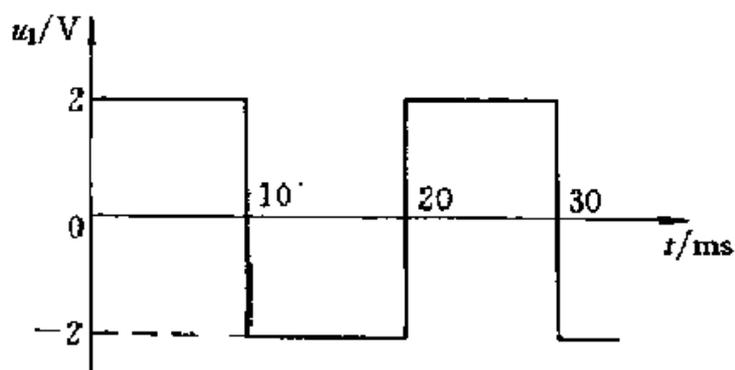


图 P7-13

解:

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_I dt + U_o(0) = -\frac{u_I}{RC} (t - t_0) + U_o(t_0)$$

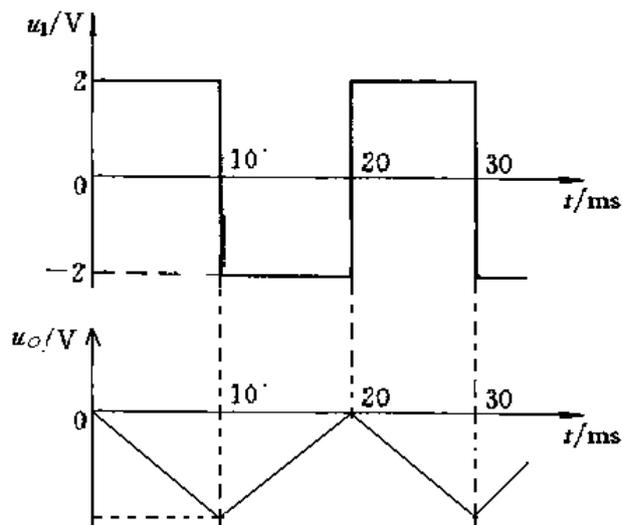
① $t=(0\sim 10)\text{ms}$ 期间, $u_o = -\frac{2}{10^4 \times 10^{-6}} t = -200t(\text{V})$, 当 $t=10\text{ms}$ 时, $u_o=-2\text{V}$ 。

② $t=(10\sim 20)\text{ms}$ 期间, $u_o = -\frac{-2}{10^4 \times 10^{-6}} (t - 0.01) - 2 = [200(t - 0.01) - 2](\text{V})$

当 $t=20\text{ms}$ 时, $u_o=0$ 。

③

u_o 的波形见下图。



本题的意图是, 当积分电路的输入信号为矩形波时的输入、输出关系, 学习画波形, 并体会积分电路的波形变换作用。

◆◆题 7-14 图 P7-14 为一波形转换电路, 输入信号 u_I 为矩形波。设运算放大器为理想的, 在 $t=0$ 时, 电容器两端的初始电压为零。试进行下列计算, 并画出 u_{o1} 和 u_o 的波形。

① $t=0$ 时, $u_{o1}=?$ $u_o=?$

② $t=10\text{ms}$ 时, $u_{o1}=?$ $u_o=?$

③ $t=20\text{ms}$ 时, $u_{o1}=?$ $u_o=?$

④ 将 u_{o1} 和 u_o 的波形画在下面。时间要对应并要

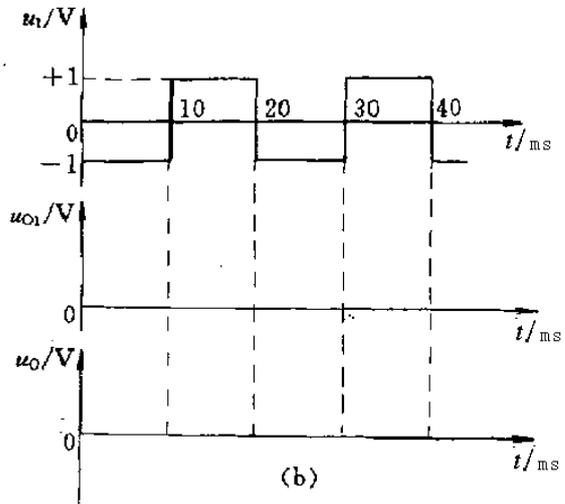
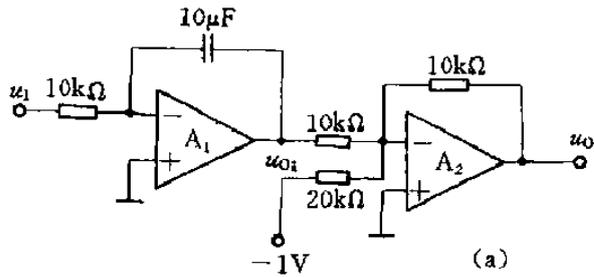


图 P7-14

求标出幅值，波形延长到 $t > 30\text{ms}$ 。

解：

$$u_{O1} = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_I dt + U_{O1}(t_0) = -\frac{u_I}{RC} (t - t_0) + U_{O1}(t_0)$$

$$= -\frac{u_I}{10^4 \times 10^{-6}} (t - t_0) + U_{O1}(t_0) = -100u_I (t - t_0) + U_{O1}(t_0)$$

$$u_O = -\left[\frac{R_F}{R_1} u_{O1} + \frac{R_F}{R_2} \times (-1) \right] = -\frac{10^4}{10^4} u_{O1} - \frac{10^4}{2 \times 10^4} \times (-1)$$

$$= -u_{O1} + 0.5 = [100u_I (t - t_0) - U_{O1}(t_0) + 0.5] \text{V}$$

① $t=0$ 时， $u_{O1}=0$ ， $u_{O2}=0.5\text{V}$ 。

② $t = (0 \sim 10) \text{ms}$ 期间， $u_I = -1\text{V}$ ， $U_{O1}(t_0) = 0$ ，则

$$u_{O1} = -100 \times (-1)t = 100t(\text{V})， u_O = 100 \times (-1)t + 0.5 = (-100t + 0.5)\text{V}$$

$t=10\text{ms}$ 时， $u_{O1}=1\text{V}$ ， $u_O = -0.5\text{V}$ 。

③ $t = (10 \sim 20)$ ms 期间, $u_i = 1V, U_{o1}(t_0) = 1V$, 则

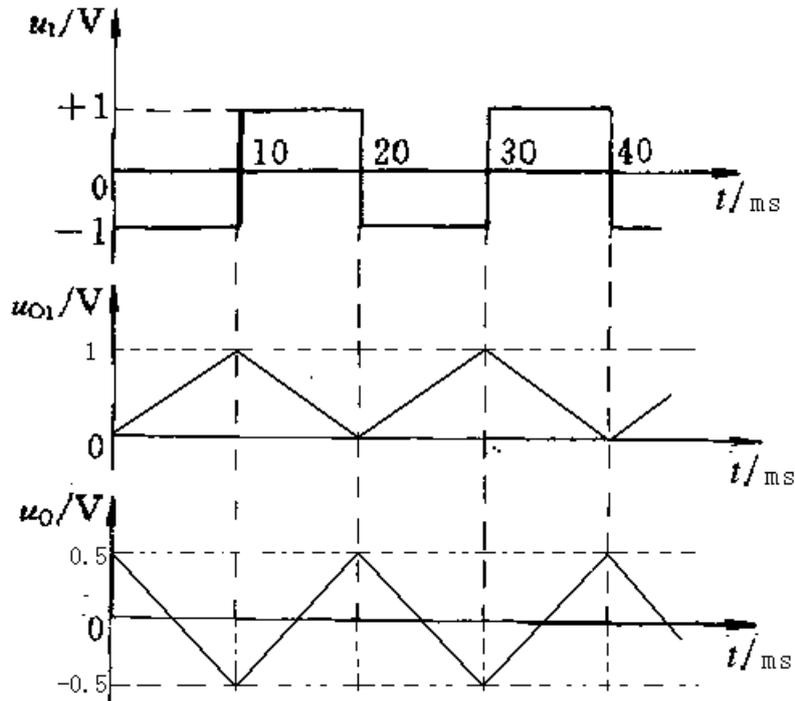
$$u_{o1} = -100 \times 1 \times (t - 0.01) + 1 = [-100(t - 0.01) + 1]V,$$

$$u_o = 100 \times 1 \times (t - t_0) - 1 + 0.5 = [100(t - t_0) - 0.5]V$$

$t = 20$ ms 时, $u_{o1} = 0, u_o = 0.5V$ 。

④

u_{o1} 和 u_o 的波形如下图所示, 可见, 积分电路将矩形波转换为三角波。



本题的意图是对求和电路和积分电路进行综合训练, 并通过画波形来体会积分电路的波形变换作用。

◆◆ 习题 7-15 试分析图 P7-15 电路中的各集成运放 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别组成何种运算电路, 设电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R$, 试分别列出 u_{o1} 、 u_{o2} 、 u_{o3} 和 u_o 的表达式。

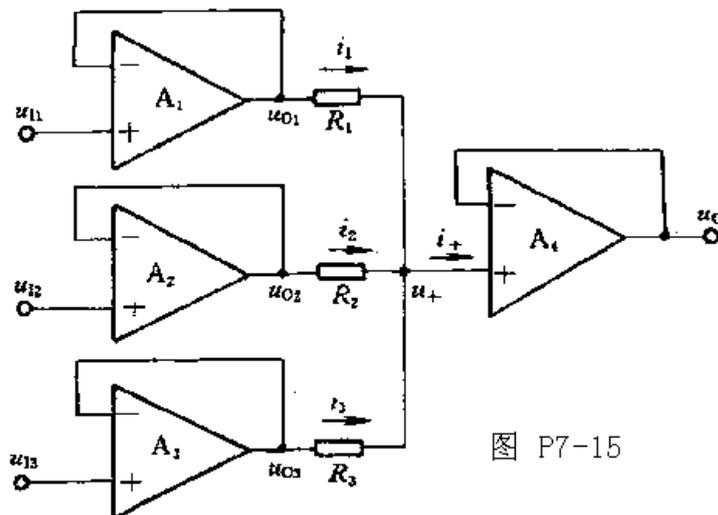


图 P7-15

解:

① A₁、A₂、A₃ 均组成电压跟随器，A₄ 组成同相输入求和电路，因此

$$u_{O1} = u_{I1} \quad u_{O2} = u_{I2} \quad u_{O3} = u_{I3}$$

$$\text{虚断} \Rightarrow i_1 + i_2 + i_3 = i_+ = 0 \Rightarrow \frac{u_{O1} - u_+}{R_1} + \frac{u_{O2} - u_+}{R_2} + \frac{u_{O3} - u_+}{R_3} = 0$$

$$\xrightarrow{u_{O1}=u_{I1} \quad u_{O2}=u_{I2} \quad u_{O3}=u_{I3}} \frac{u_{I1} - u_+}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_+}{R_2} + \frac{u_{I3} - u_+}{R_3} = 0$$

②

$$\xrightarrow{\text{虚短} \Rightarrow u_+ = u_- = u_O} \frac{u_{I1} - u_O}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_O}{R_2} + \frac{u_{I3} - u_O}{R_3} = 0$$

$$\xrightarrow{R_1=R_2=R_3=R} u_O = \frac{1}{3}(u_{I1} + u_{I2} + u_{I3})$$

本题的意图是训练运用“虚短”和“虚断”的基本概念，分析由多个电压跟随器组成的求和运算电路。

◆◆ 习题 7-16 在图 P7-16 中，设 A₁、A₂、A₃、A₄ 均为理想运放；

① A₁、A₂、A₃、A₄ 各组成何种基本运算电路？

② 分别列出 u_{o1}、u_{o2}、u_{o3} 和 u_{o4} 与输入电压 u_{i1}、u_{i2}、u_{i3} 之间的关系。

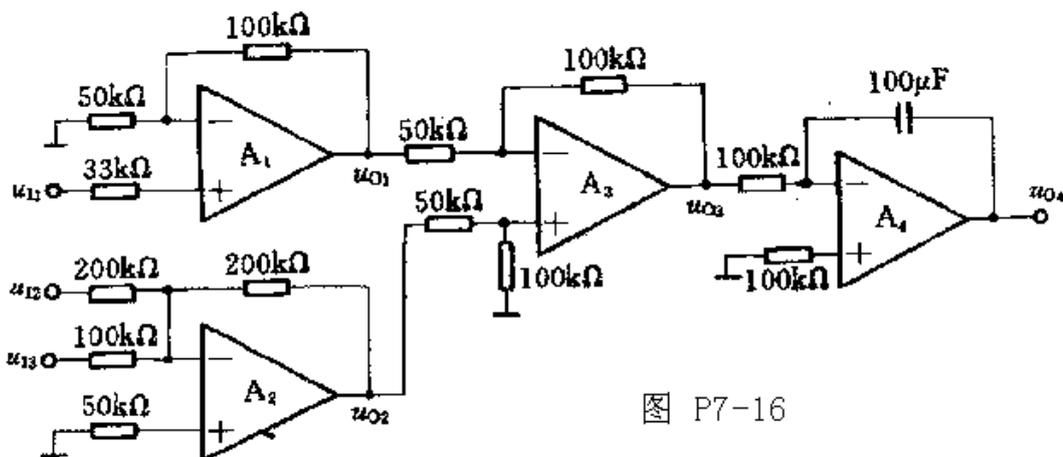


图 P7-16

解:

① A₁: 同相输入比例电路，A₂: 反相输入求和电路，A₃: 差分输入比例电路，A₄: 积分电路。

$$\textcircled{2} \quad u_{O1} = \left(1 + \frac{100}{50}\right)u_{I1} = 3u_{I1}, \quad u_{O2} = -\left(\frac{200}{200}u_{I2} + \frac{200}{100}u_{I3}\right) = -(u_{I2} + 2u_{I3})$$

$$u_{O3} = -\frac{100}{50}(u_{O1} - u_{O2}) = -2\{3u_{I1} - [-(u_{I2} + 2u_{I3})]\} = -2(3u_{I1} + u_{I2} - 2u_{I3})$$

$$\begin{aligned} u_{O4} &= -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}} \int u_{O3} dt = -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}} \int u_{O3} dt \\ &= -\frac{1}{10} \times \int [-2(3u_{I1} + u_{I2} - 2u_{I3})] dt = -\frac{1}{5} \int (3u_{I1} + u_{I2} - 2u_{I3}) dt \end{aligned}$$

本题的意图是对比例、求和、积分等各种运算电路进行综合训练。